



**Algoritmo de Criação de Planos de Manutenção
Otimizados Com Auxílio dos Dados Obtidos Através do
Controlo de Condição**

Duarte Henriques Sodré de Castro

Disserta o para obten o do Grau de Mestre em
Gestão e Tecnologia da Manuten o Aeronáutica

Júri

Orientador: Professor Manuel Moreira de Freitas

Coorientador: Professor João Taborda Amaral Craveiro

Outubro 2022

Agradecimentos

Começo por agradecer ao Professor Manuel Freitas pela oportunidade para a realização deste trabalho. Pela sua disponibilidade nas reuniões que tivemos, e pela sua orientação importante na definição rigorosa do âmbito do trabalho.

Ao Professor João Craveiro agradeço, muito em particular sua disponibilidade nas reuniões que tivemos, e pela sua orientação importante na definição rigorosa do âmbito do trabalho, pelo material que me facultou e pelas pesquisas sugeridas.

Aos meus pais por tudo o mais.

Resumo

Em qualquer indústria atual que lide com equipamentos suscetíveis de falharem é importante que seja feita uma análise para verificar a hipótese da falha, e depois implementar novos planos de manutenção ou de rever/otimizar o plano já existente.

A presente dissertação trata do desenvolvimento de um algoritmo que tem o propósito de obter por via analítica um plano de manutenção para um determinado equipamento que pode ser ajustado em função da evolução da sua condição. Assim, para um sistema composto por vários componentes, o algoritmo pretende definir o plano adequado à operação prevista, podendo o critério ser o mínimo custo de ciclo de vida ou a máxima disponibilidade, e ser otimizado, tendo em conta os parâmetros de fiabilidade requeridos. Este plano serve de base para o algoritmo depois ajustar as operações de manutenção à evolução dos parâmetros de condição que refletem a evolução da fiabilidade dos componentes, por forma a continuamente adaptar o plano consoante a condição medida aos componentes.

O objetivo destes algoritmos é ajustar os planos de manutenção à real situação de cada equipamento, permitindo integrar a informação estatística decorrente do passado com a informação em tempo real que decorre da avaliação da condição dos componentes.

Palavras-Chave: Planos e manutenção, fiabilidade, disponibilidade, controlo de condição, otimização.

Abstract

Nowadays every industry deal with equipment susceptible to failure, thus care should be taken to analyze the probability of failure and afterwards implement a new maintenance plan, or review/optimize the existing maintenance plan.

The present dissertation develops an algorithm that aims to obtain, through an analytical mean, a maintenance plan for the target equipment. Thus, for a system composed of various components, the algorithm's goal intends to define an adequate maintenance plan for the equipment's foreseen operation, using the lowest life cycle cost or highest availability as objectives considering established reliability parameters. This plan serves as a base for the algorithm to afterwards adjust the maintenance operations to the evolution of the condition parameters that reflect the evolution of the reliability of the components which will allow for the continuous adaptation of the maintenance plan to the condition of the equipment's components.

The objective of these algorithms and dissertation is to adjust the maintenance plans to the real situation of each piece of equipment, allowing the integration of statistical information arising from the past with real-time information resulting from the evaluation of the condition of the components.

Keywords: Maintenance plans, reliability, availability, condition monitoring, optimization.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Estado da arte	1
1.2	Objetivos e organização da tese	4
2	Planos de manutenção e Controlo de condição	6
2.1	Estruturação de um equipamento	6
2.2	Análise FMECA	8
2.3	Estratégia de manutenção	9
2.3.1	Estatística e Fiabilidade.....	10
2.3.2	Distribuições de apoio à Manutenção	12
2.3.3	Disponibilidade	13
2.3.4	Manutibilidade	14
2.3.5	Custo ciclo de vida	15
2.4	Método de <i>Monte Carlo</i>	16
3	Controlo de condição	17
4	Método: O Algoritmo	24
4.1	Modelo considerado	24
4.2	Parâmetros	25
4.3	Modelação da falha	27
4.4	Plano de manutenção Inicial	30
4.5	Optimizador	32
4.6	Controlo de condição.....	33
4.6.1	Obtenção das curvas de previsão das vibrações	33
4.6.2	Ajuste dos intervalos	35
5	Resultados: Aplicação no modelo	36
5.1	Worksheet “SimuC”	36
5.2	Worksheet “Evolução”	42
5.3	Discussão de resultados	50
6	Conclusões e estudos futuros	55
6.1	Conclusões	55
6.2	Estudos futuros.....	55

7	Bibliografia.....	58
	ANEXO I.....	61
	ANEXO II.....	68

Lista de figuras

Figura 1.1: Invenções da segunda revolução industrial. (Muntone, 2012)	2
Figura 2.1 - Classificação de dos diferentes níveis de um equipamento com localização. (Adaptado de (ISO 14224, 2016))	6
Figura 2.2 - Equipamento com três componentes em série.	11
Figura 2.3 - Equipamento com três componentes em paralelo.	11
Figura 2.4 - Esquema de operação e falha de um equipamento. A verde o sistema está operacional, a vermelha está reparação devido a falhas.	14
Figura 2.5 - Esquema de operação, ações preventivas, e falha de um equipamento. A verde o sistema está operacional, a vermelha está reparação devido a falhas e azul está parado para manutenção preventiva.	14
Figura 3.1 - Curva da banheira, descreve a evolução da probabilidade de falha típica de um equipamento. (Silva, 2005)	17
Figura 3.2 - Características simples de uma curva de dados no domínio do tempo. (Silva, 2005)	19
Figura 3.3 - Características simples de uma curva de dados no domínio da frequência. (Silva, 2005)	20
Figura 3.4 - Análise do espectro de um equipamento com funcionamento normal e com funcionamento degradado. Fonte: (Limble CMMS, 2021)	20
Figura 3.5 – Zona de avaliação, amplitude de vibração vs velocidade de rotação. (Silva, 2005)	21
Figura 3.6. – Zona de avaliação, amplitude de vibração limite para vários tipos de máquinas. (Silva, 2005).....	21
Figura 3.7 - Evolução de vibração e desenvolvimento de uma falha que necessitou de reparação. Fonte: MiiT-Informain	22
Figura 4.1 – Zonas limite para a vibração de bombas centrífugas com potência acima de 1 kW. Retirado de (ISO 10816, 2009)	34
Figura 5.1 - Gráfico de comparação entre o custo total e a disponibilidade, iteração nº 1.	39
Figura 5.2 - Gráfico de comparação entre o custo total e a disponibilidade, iteração nº 2.	40
Figura 5.3 - Gráfico de comparação entre o custo total e a disponibilidade, iteração nº 3.	40
Figura 5.4 - Dados da vida e vibração para o componente A, 1ª aproximação.	46
Figura 5.5 - Dados da vida e vibração para o componente B, 1ª aproximação.	47
Figura 5.6 - Dados da vida e vibração para o componente C, 1ª aproximação.	47
Figura 5.7 - Dados da vida e vibração para o componente D, 1ª aproximação.	47
Figura 5.8 - Dados da vida e vibração para o componente E, 1ª aproximação.	48
Figura 5.9 - Dados da vida e vibração para o componente A, 2ª aproximação.	48

Figura 5.10 - Dados da vida e vibração para o componente B, 2ª aproximação.	48
Figura 5.11 - Dados da vida e vibração para o componente C, 2ª aproximação.	49
Figura 5.12 - Dados da vida e vibração para o componente D, 2ª aproximação.	49
Figura 5.13 - Dados da vida e vibração para o componente E, 2ª aproximação.	49
Figura 5.14 - Comparação entre a fiabilidade global do <i>SimuC</i> vs a fiabilidade global do <i>Evolução</i> . 2ª aproximação.....	50
Figura 7.1 - Conjunto de falhas que ocorrem num componente de uma máquina. A colunas ímpares representam o número do registo, as pares o registo do tempo de falha em horas. (1/2)	61
Figura 7.2 - Conjunto de falhas que ocorrem num componente de uma máquina. A colunas ímpares representam o número do registo, as pares o registo do tempo de falha em horas. (2/2)	62
Figura 7.3 - Gráfico com as falhas do componente agrupadas em diversos intervalos de tempo (em horas).	62
Figura 7.4 - Aplicação do método de Bernard nos 500 registos. (Tempos apresentados em horas) (1/5)	64
Figura 7.5 - Aplicação do método de Bernard nos 500 registos. (Tempos apresentados em horas) (2/5)	64
Figura 7.6 - Aplicação do método de Bernard nos 500 registos. (Tempos apresentados em horas) (3/5)	65
Figura 7.7 - Aplicação do método de Bernard nos 500 registos. (Tempos apresentados em horas) (4/5)	65
Figura 7.8 - Aplicação do método de Bernard nos 500 registos. (Tempos apresentados em horas) (5/5)	66
Figura 7.9 - Curva da densidade de falha e da probabilidade acumulada de falha para distribuição de <i>Weibull</i> (parâmetros no título do gráfico). A azul está representada a curva de densidade de falha e a laranja a probabilidade acumulada de falha.	67
Figura 7.10 - Quadrado amarelo que contém três áreas de cores diferentes.	68

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Correlação entre a revolução industrial e a manutenção. (Coleman, 1956) ...	4
Tabela 2.1 - Definição da localização do equipamento e definição do equipamento em si. (adaptado de (ISO 14224, 2016))	7
Tabela 2.2 – Exemplo de critérios de severidade para análise FMECA. Adaptado de (Carvalho, Medeiros, Madeira, & Cabral, 2022).....	9
Tabela 2.3 – Exemplo de categorias de frequência da ocorrência para análise FMECA. Adaptado de (Carvalho, Medeiros, Madeira, & Cabral, 2022)	9
Tabela 4.1 - Parâmetros dos componentes do sistema modelo.	25

Tabela 4.2 - Tabela de interação dos componentes.	25
Tabela 4.3 - Custos de manutenção para o sistema modelo.	27
Tabela 4.4 - Tempos de manutenção para o sistema modelo.	27
Tabela 4.5 – Alguns valores possíveis para o TTF dos componentes.	28
Tabela 4.6 – Alguns valores possíveis para as inspeções.	29
Tabela 4.7 – Alguns valores possíveis para as substituições preventivas.	29
Tabela 4.8 – Alguns valores possíveis para as substituições corretivas.	29
Tabela 4.9 – Valores de inicialização do algoritmo.	31
Tabela 5.1 - Dados iniciais da simulação relativos à manutenção componentes.	36
Tabela 5.2 - Dados iniciais da simulação gerais.	36
Tabela 5.3 - Valores para os intervalos de substituição preventiva, iteração nº1.	37
Tabela 5.4 - Valores importantes para a análise do melhor intervalo, iteração nº1.	37
Tabela 5.5 - Valores importantes para a análise do melhor intervalo, iteração nº2.	39
Tabela 5.6 - Valores para os intervalos de substituição preventiva, iteração nº3.	41
Tabela 5.7 - Valores importantes para a análise do melhor intervalo, 3ª iteração, a verde está assinalada a melhor opção.	41
Tabela 5.8 - Valores importantes para a análise do melhor intervalo, 3ª iteração com 200 corridas, a verde está assinalada a melhor opção.	41
Tabela 5.9 - Resumo dos eventos que ocorreram na simulação, <i>worksheet</i> “Evolução”. Sem degradação dos componentes.	43
Tabela 5.10 - Resumo dos eventos que ocorreram na simulação, <i>worksheet</i> “SimuC”. Sem degradação dos componentes.	43
Tabela 5.11 - Fiabilidade, disponibilidade, e custos obtidos das simulações criadas pelas duas <i>worksheets</i> . Sem degradação dos componentes.	44
Tabela 5.13 - Resumo dos eventos que ocorreram na simulação, <i>worksheet</i> “SimuC”. Com degradação dos componentes.	45
Tabela 5.14 - Fiabilidade, disponibilidade, e custos obtidos das simulações criadas pelas duas <i>worksheets</i> . Com degradação dos componentes.	45

Glossário

Abreviaturas

Abreviatura	Descrição
<i>OEE</i>	Eficiência Global do Equipamento
<i>ISO</i>	Organização Internacional para Padronização
<i>LRU</i>	Line Replaceable Units
<i>SRU</i>	Shop Replaceable Units
<i>FMECA</i>	Failure Mode Effects and Criticality Analysis
<i>MTTF</i>	Mean Time To Fail
<i>MTTM</i>	Mean Time To Maintenance
<i>MTTR</i>	Mean Time To Repair/Repair
<i>MTTR_c</i>	Mean Time To Fail (Corretiva)
<i>MTTR_p</i>	Mean Time To Fail (Preventiva)
<i>MTBF</i>	Mean Time Between Fail
<i>LCC</i>	Life Cycle Cost
<i>RMS</i>	Root-Mean-Square
<i>MTBUR</i>	Mean Time Between Unscheduled Removal
<i>TTF</i>	Time To Fail
<i>TTR</i>	Time To Repair

Símbolo Latin

Símbolo	Descrição
<i>D</i>	Disponibilidade
<i>f</i>	Função probabilidade acumulada de falha
<i>F</i>	Função densidade de falha
<i>R</i>	Função Fiabilidade
<i>t</i>	Tempo
<i>t₀</i>	Parâmetro de localização da distribuição Weibull

Símbolo grego

Símbolo	Descrição
α	Parâmetro de forma da distribuição Weibull
β	Parâmetro de escala da distribuição Weibull
Γ	Função Gamma
π	Pi = 3.14159
λ	Taxa de falhas da distribuição exponencial negativa
μ	Média da distribuição normal
σ	Desvio padrão da distribuição normal
μ, σ^2	Variância da distribuição normal

1 Introdução

Hoje em dia, como a propagação e evolução da tecnologia vai sendo cada vez mais importante a realização de manutenção preventiva nos equipamentos, especialmente se estivermos a falar de equipamentos críticos nas áreas da medicina, aviação, naval, etc... onde uma falha grave poderá ter consequências muito desastrosas. Mesmo fora destas áreas críticas, para muitas indústrias o bom funcionamento das suas máquinas é crucial para a produção de bens e para a geração de lucro. À medida que a tecnologia vai evoluindo e estas máquinas vão sendo cada vez mais complexas e capazes de produzir bens mais depressa e a um menor custo. Mas ter uma máquina mais avançada também significa ter de ter mais cuidado com a sua manutenção, pois maior complexidade significa mais componentes onde a falha pode acontecer.

1.1 Estado da arte

O primeiro conceito de manutenção era mais primitivo do que o que é hoje em dia. Na primeira revolução industrial foi a invenção da máquina a vapor por *James Watt* (Spear, 2008) que veio parcialmente substituir a mão de obra na agricultura e manufatura. Nessa época a abordagem para a manutenção era muito simples, trabalhar até partir (*run to failure*), onde apenas se fazia manutenção corretiva quando o equipamento se encontrava inoperativo, e quando não fosse possível a sua reparação era adquirido um novo (FTMaintenance, 2019).

Esta aproximação mais simplista decorria de limitações tecnológicas e organizativas. As máquinas eram pouco robustas e propícias à falha, mas as necessidades de produção não eram tão elevadas, logo haveria menos necessidade de manutenção preventiva. Este tipo de manutenção mais simples tinha a vantagem de que não havia custos iniciais, apenas há custos de manutenção quando aparece a falha, e não era necessário fazer-se planeamento, mas como desvantagens temos o aparecimento de falhas imprevistas, problemas de segurança, tempos de inatividade maiores, etc... (Christer & Whitelaw, 1983). No entanto, dada a simplicidade das máquinas, não eram necessários técnicos muitos especializados para efetuar a manutenção.

À medida que vamos avançando no tempo, vai aumentando a procura e logo a necessidade de aumentar a produção, com a segunda revolução industrial houve um crescimento exponencial nas descobertas científicas, na normalização, na industrialização e na produção em massa (Muntone, 2012), na Figura 1.1 apresentam-se algumas das invenções que ocorreram durante este período.

Date	Inventor	Process or Machine
1830s	Samuel F. B. Morse	Telegraph (1835) Morse code (1838)
1850s	Henry Bessemer William Kelly	Bessemer process
1853	Elisha Otis	Mechanized passenger elevator
1867	Christopher Sholes	Typewriter
1876	Alexander Graham Bell	Telephone
1877	Thomas Alva Edison	Phonograph
1879	Edison and Lewis Latimer	Lightbulb
1869	George Westinghouse	Compressed-air brake
1886	Westinghouse and Nikola Tesla	High-voltage alternating electric current (AC)
1893	Charles and Frank Duryea	First practical motorcar in the United States
1903	Wilbur and Orville Wright	First powered piloted plane flight

Figura 1.1: Invenções da segunda revolução industrial. (Muntone, 2012)

Esta evolução levou à criação de máquinas mais complexas que podiam trabalhar durante mais tempo, *Frederick Winslow Taylor* propôs uma melhoria na organização do local de trabalho, e tudo isto levou a um aumento na produtividade (John & Bruton). Mas com todos estes avanços o efeito do aparecimento da falha era cada vez mais grave, e como tal apareceram as primeiras formas de manutenção preventiva; onde era feita a substituição de certos componentes em intervalos de tempo já determinados (mesmo que tal não fosse necessário), um exemplo deste tipo de manutenção foi proposto por *Henry Ford* no manual para o Modelo T da Ford (Ford, 1919).

A segunda guerra mundial marca o aparecimento da investigação operacional, da otimização e da importância da fiabilidade, e começou-se a perceber que a possibilidade de evitar falhas através da execução de ações de manutenção preventiva podia trazer vantagens em termos de redução dos custos de manutenção, sendo que com o final da segunda guerra mundial houve a necessidade de reconstrução do setor industrial: Iniciou-se então uma expansão acelerada na produção e um aumento da competitividade das empresas, mas este tipo de expansão resultaria num aumento acentuado dos custos de manutenção, e como tal os conceitos de manutenção preventiva tornaram-se mais necessários e aceites.

Com a chegada da terceira revolução industrial apareceu o conceito de *TPM*, Manutenção Produtiva Total, um conceito desenvolvido por *Seichi Nakajima* onde os operadores das máquinas também eram responsáveis por efetuar manutenção de rotina nas mesmas com o objetivo de aumentar o seu tempo de vida e diminuir o risco de falhas. Adicionalmente, ao terem uma melhor compreensão do equipamento era mais fácil transmitirem os problemas à equipa de técnicos especializados para resolverem o problema no caso de falha (Poor, Ženišek, & Basl, 2019).

Nos anos 80 começaram a aparecer os conceitos de controlo de condição baseado na ideia de que independentemente da probabilidade de ocorrência de uma falha, cuja data previsual pode ser aproximada por via estatística, o estado da sua condição em cada momento determina a necessidade de executar operações de manutenção.

A condição medida por via de parâmetros que podem estar relacionados com mecanismos de degradação, eventualmente em curso, é determinante para aferir a respetiva fiabilidade e por essa via definir a necessidade de execução de operações de manutenção.

Nessa perspectiva para além da manutenção corretiva e preventiva, à época existentes, passou a existir a manutenção preditiva, visto que a aproximação descrita se baseava na criação de tendências que permitem definir no tempo as intervenções necessárias.

É interessante referir que *CH Waddington*. e a sua equipa, uns dos pioneiros neste domínio, deram conta enquanto trabalhavam com a *Royal Air Force Coastal Command 502*, que a taxa de falhas das aeronaves era muito maior logo a seguir à realização de ações de manutenção preventiva, algo que ia contra o principal objetivo deste tipo de manutenção. Significava que a intervenção realizada diminuía a fiabilidade dos equipamentos, e muitas vezes era realizada sem necessidade, pois o equipamento ainda dispunha muita vida residual. A solução para mitigar esta situação seria planejar as ações de manutenção não com uma periodicidade fixa, mas sim de acordo com condição atual dos componentes (Darragh, 2020)

Veio a constatar-se que as vibrações eram o parâmetro mais genérico e utilizável para determinar a condição. A acreditação desta estratégia decorreu da fiabilização dos mecanismos que relacionam a evolução dos parâmetros versus a degradação dos componentes.

A medida da amplitude da vibração global da vibração ou da amplitude de frequências relacionadas com funções de excitação, quantificadas pelas características geométricas dos equipamentos, permite dar ideia dos mecanismos de degradação em curso, tendo sido desenvolvidas diversas normas, que definem limites para diversos domínios. (Crawford, 1992)

No final dos anos 90, à medida que os sistemas de aquisição de sinal ficaram mais fiáveis e as metodologias de análise mais eficazes, tornou-se uma metodologia muito eficaz e genérica e que suporta a estratégia de manutenção preditiva,

Assim em paralelo com uma aproximação de médio prazo, baseado na aproximação estatística que suportava a estratégia de manutenção preventiva, apareceu uma outra de curto prazo, que suportava a estratégia de manutenção preditiva e que validava e atualizava a anterior, de facto a predição da próxima intervenção era independente da aproximação estatística, mas podia ser compaginada com ela. (Broch, 1980)

Na mesma época também apareceu a *RCM*, manutenção centrada na confiabilidade, um tipo de manutenção criado devido a uma enorme taxa de falhas na indústria aeronáutica e tem como objetivo impedir que o equipamento falhe, e em vez de uma orientação cega para preservar o equipamento à custa de programas extensivos de manutenção; propõe que com base no conhecimento do equipamento, e na análise dos modos de falhas e suas consequências; definir a estratégia de manutenção capaz de prever ou prevenir cada falha (Christiansen, 2017).

Com o desenvolvimento das tecnologias informáticas e computacionais começaram a aparecer programas *software* capazes de agendar a realização das tarefas de manutenção e de receber informação sobre quais os trabalhos realizados nos equipamentos. A quarta evolução industrial está marcada por uma maior distribuição da internet e em avanços tecnológicos relacionados com essa área, assim nasceram novas estratégias de manutenção, e o controlo de condição onde as tarefas de manutenção não são executadas com base em intervalos de tempo pré-definidos, mas sim com base na análise de dados relativos ao equipamento (por exemplo: vibração, temperatura, pressão, etc...).

. Mesmo com esta nova técnica de manutenção existe o problema da recolha da informação, o modo mais convencional é fazer medições com uma certa periodicidade, apontar os valores recolhidos, e comparar com os dados recolhidos anteriormente para assim se conseguir perceber qual o estado do equipamento. À medida que foram desenvolvidas novas tecnologias, começou-se a ser possível recolher os dados de forma contínua (Sensor-Works, 2018). Para suportar este tipo de manutenção existem vários sistemas: a análise de *Big Data* e a inteligência artificial, sendo que a combinação dos dois permite analisar a informação e detetar entre outros, padrões e correlações por forma a prever a falha do equipamento (Orosz, Sörös, Raisz, & Tamus, 2015); uma enorme quantidade de dados vinda dos vários utilizadores e partilhadas através de *software* ligado à Internet. Assim é possível perceber criar modelos e perceber em tempo real qual é o estado do equipamento, quando é que é previsto falhar e quando é que se devem programar as tarefas de manutenção. Na Tabela 1.1 encontra-se um resumo dos tópicos abordados.

Tabela 1.1: Correlação entre a revolução industrial e a manutenção. (Coleman, 1956)

Industry revolution	Industry 1.0	Industry 2.0	Industry 3.0	Industry 4.0
Characteristics of the industrial revolution	Mechanization, steam power, weaving loom	Mass production, assembly lines, electrical energy	Automation, computers, electronics	Cyber Physical Systems, IoT, networks, cloud, BDA
Type of maintenance	Reactive maintenance	Planned maintenance	Productive maintenance	Predictive maintenance
Inspection	Visual inspection	Instrumental inspection	Sensor monitoring	Predictive analysis
OEE	<50%	50-75%	75-90%	>90%
Maintenance team reinforcement	Trained craftsmen	Inspectors	Reliability engineers	Data scientists

1.2 Objetivos e organização da tese

O objetivo desta dissertação é estudar e criar um algoritmo capaz de gerar planos de manutenção otimizados, com base em parâmetros de fiabilidade e disponibilidade estabelecidos considerando o menor custo ciclo de vida. Estes planos poderiam ser gerados para qualquer equipamento desde que se saiba quais os parâmetros de distribuição que controlam a falha dos seus componentes constituintes; estes parâmetros, caso não sejam disponíveis pelo fabricante, podem ser obtidos através de um registo onde esteja informação sobre a os diversos tempos de falha dos componentes. Adicionalmente, caso seja necessário, o algoritmo também é capaz de receber dados provenientes do controlo de condição, que indicam a condição geral do equipamento, e é capaz de alterar o algoritmo consoante comparação com a curva de degradação já pré-estabelecia para o equipamento.

Este documento encontra-se organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 começa com uma pequena introdução à necessidade de estruturação do equipamento, e ao estudo dos modos falha por forma a perceber a necessidade de implementar planos de manutenção, com o objetivo de minimizar o risco de falha e melhorar a disponibilidade e o custo dos equipamentos. De seguida faz-se uma revisão do estado de arte da criação e otimização de planos de manutenção, bem como eles podem ser adaptados usando os dados do controlo de condição. O Capítulo 3 aborda alguns

conceitos teóricos que depois servem como base para o algoritmo, incluindo a estruturação de equipamentos, a fiabilidade, a distribuição de *Weibull*, a disponibilidade, e o método de *Monte Carlo*. O Capítulo 4 dedica-se à explicação do funcionamento do algoritmo. O Capítulo 5 aplica o algoritmo a um sistema modelo e analisa os resultados. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho realizado e as propostas para estudos futuros.

2 Planos de manutenção e Controlo de condição

Neste capítulo será feita uma introdução aos principais conceitos para a concretização de planos de manutenção, incluindo formas para estruturar um sistema, como definir o que é que deve fazer parte de um plano de manutenção, a interação entre operações de manutenção, da produção e a interação entre os diferentes componentes, a condição dos equipamentos, a validação e afinação de planos de manutenção. Será feita também uma pequena introdução a conceitos de controlo de condição, como é que os dados podem ser utilizados para aferir condição dos diversos componentes, e como podem ser utilizados para ajustar um plano de manutenção. Este capítulo contém algumas os fundamentos para as metodologias utilizadas por detrás do algoritmo.

2.1 Estruturação de um equipamento

Normalmente quando se pensa num equipamento, pensa-se dele como um todo: um torneador, uma máquina rebarbadora, um carro, etc... No entanto, para permitir a construção efetiva de um plano de manutenção é necessário ter em consideração não só os vários componentes que constituem o equipamento, como também toda a estrutura que os suporta. A ISO 14224:2016 é uma norma que, entre muitas coisas, define uma forma de estruturar um equipamento e permite criar uma base para a construção e planos de manutenção. De acordo com ISO podemos formular a taxonomia de um equipamento de acordo com a Figura 2.1, onde nos níveis de topo encontra-se o contexto onde está inserido o equipamento e nos de baixo encontra-se o equipamento em si (ISO 14224, 2016).

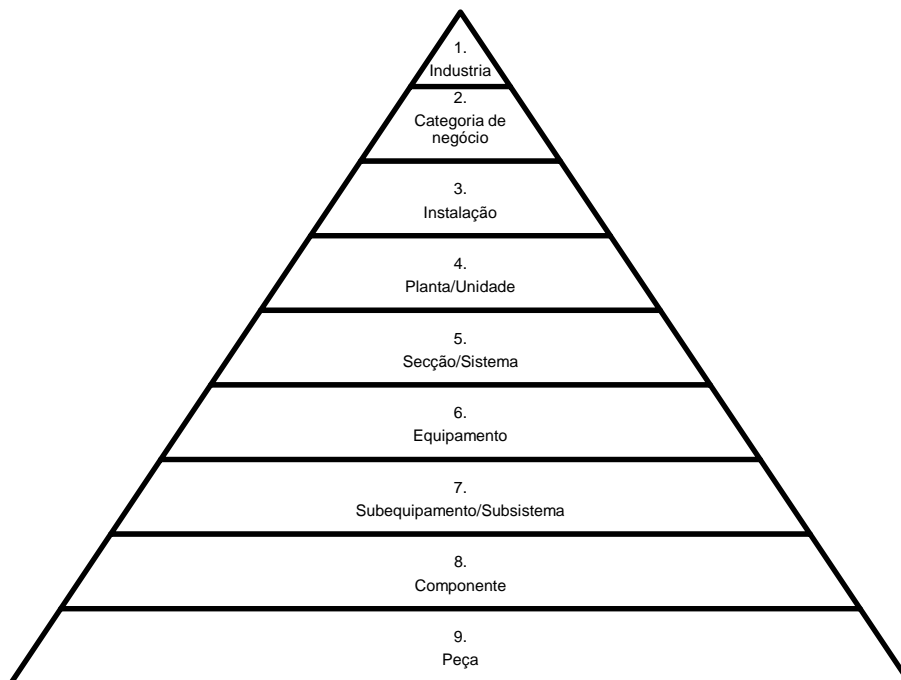


Figura 2.1 - Classificação de dos diferentes níveis de um equipamento com localização. (Adaptado de (ISO 14224, 2016))

Dentro do esquema apresentado na Figura 2.1, do nível 1 ao 5 são os níveis relacionados com a localização/tipo de uso do equipamento, ou seja, não se está a olhar para o equipamento em si, mas sim para o tipo de estrutura onde está inserido. Estes níveis são essenciais porque um equipamento pode ser utilizado em vários tipos de indústria, e como tal, terá de ser tratado de forma diferente e com diferentes planos de manutenção conforme aquela em que está inserido o equipamento. Os restantes 4 estão relacionados com o equipamento em si e com os diferentes sistemas/componentes que o compõem. Na Tabela 2.1, está explicado cada um dos níveis da pirâmide.

Tabela 2.1 - Definição da localização do equipamento e definição do equipamento em si. (adaptado de (ISO 14224, 2016))

<i>Principal categoria</i>	<i>Nível da pirâmide</i>	<i>Definição</i>
<i>Tipo de uso / Localização</i>	1	O tipo de indústria onde está a ser usado o equipamento.
	2	O tipo de negócio da indústria onde está usado o equipamento.
	3	O tipo de complexo industrial onde está instalado o equipamento.
	4	O tipo de instalação do complexo onde está instalado o equipamento.
	5	O tipo de zona da instalação onde está instalado o equipamento.
<i>Equipamento</i>	6	O tipo de equipamento em si.
	7	Os subequipamentos/subsistemas que compõem o equipamento.
	8	Os componentes que necessitam de manutenção
	9	Um dos componentes do equipamento

Um sistema é um conjunto de equipamentos destinados a uma determinada função, dentro de cada equipamento existem vários componentes, alguns mais simples, outros mais complexos, mas cada um destes componentes está incluído dentro de um subsistema do equipamento (especialmente se for um equipamento complexo, que tem vários subsistemas) aos quais o conjunto está destinado à realização de uma função, (por exemplo num sistema de ar condicionado temos subsistemas como: a zona de entrada de ar quente, a zona de arrefecimento do ar, a zona de controlo de humidade, etc.). Podemos ainda continuar a caracterizar cada um dos componentes de um equipamento, mas aqui o principal objetivo é perceber como é que podemos definir dentro de um equipamento quais são os seus componentes que podem ser reparados em linha (*LRU - Line Replaceable Units*) e quais é que têm de ser removidos e enviados para uma oficina especializada para serem reparados (*SRU – Shop Replaceable Units*).

Aproveitando esta divisão podemos, dentro de um equipamento, definir fronteiras. Estas fronteiras tem a funcionalidade de estabelecer os sistemas onde devem de ser recolhidos os dados de fiabilidade e de manutenção, estas fronteiras são importantes pois, na prática, existem vários sistemas que interagem com um equipamento, mas que não fazem parte dele (fornecimento de eletricidade, ou fornecimento de água). Assim sendo, podemos considerar todos os sistemas importantes, dentro de um equipamento, reparti-los nos seus vários componentes constituintes, e

analisa-los no sentido de perceber quais são as possíveis tarefas de manutenção aplicáveis a eles (ISO 14224, 2016).

Um exemplo pode ser um motor de combustão que é constituído por vários subsistemas e subequipamentos: baterias de arranque, pelo motor em si, pelo sistema de lubrificação, pelo sistema de arrefecimento, pelo sistema de controlo e monitorização, e outros. Dentro dos subsistemas, podemos depois dividi-los nos seus componentes, por exemplo, o sistema de arrefecimento é constituído pelo permutador, pelas ventoinhas, pelo motor, pelo filtro, pelas válvulas, pela tubagem, pela bomba, e pelo sensor para o controlo da temperatura. Até podíamos ir mais fundo, analisar os constituintes de cada componente, ou ficamos pelo nível de cima e apenas olhar para os sistemas, ou fazer uma mistura, ou seja, podíamos discriminar o sistema de arrefecimento, mas deixar o sistema de arranque sem estar discriminado. O objetivo é pegar num modelo e começar a trabalhar dele para depois chegar ao seu plano de manutenção.

2.2 Análise FMECA

Com a definição do equipamento concluída é necessário fazer-se uma análise *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FMECA). Numa análise FMECA é necessário pegar no equipamento estruturado e começar a ‘descascar’ as suas características. Começando pela realização de uma análise funcional, onde se pretende identificar extensivamente qual é a função de cada sistema e dos seus componentes constituintes; é preciso perceber qual é o seu modo operativo, ou seja, se o equipamento apenas funciona no modo normal, ou se não, que componentes do equipamento é que operam quando o sistema entra em modo degradado; se colocarmos uma fronteira em cada um dos componentes/sistemas, também podemos inferir que tipos de *inputs* e *outputs* é que tem; e, entre outros, qual é o tipo de sistema é que está envolvido. Assim, se um determinado componente não conseguir realizar a função a que está destinado considera-se que o equipamento falhou. (Chen, Liu, Liu, & Kang, 2012)

Com esta primeira informação é necessário começar a encontrar os modos de falhas, isto é, as várias formas ou acontecimentos que podem ocorrer no equipamento e que causa um funcionamento anormal, ou mesmo uma falha e paragem do mesmo. Tendo um equipamento vários níveis de estruturação, os modos de falhas têm de ser construídos ao nível mais baixo, e depois propagados para cima (por exemplo: uma falha na bomba causar uma falha no sistema de refrigeração que depois se propaga para uma falha no motor devido a sobreaquecimento). Depois de definidos os modos de falha o próximo passo é o de os analisar qualitativamente, atribuindo critérios a cada um para perceber quais é que são os mais críticos, podendo utilizar critérios como por exemplo, o nível de severidade em termos de consequências para pessoas ou para o sistema, ver Tabela 2.2; a probabilidade de acontecer aquele modo de falha, ver Tabela 2.3; os possíveis impactos em termos de custos; os possíveis impactos ambientais; a facilidade de compra do material para resolver a situação; etc...

Tabela 2.2 – Exemplo de critérios de severidade para análise FMECA. Adaptado de (Carvalho, Medeiros, Madeira, & Cabral, 2022)

SN	NÍVEL DE SEVERIDADE	CONSEQUÊNCIA PARA PESSOAS (SN-P)	CONSEQUÊNCIA PARA SISTEMAS (SN-S)
5	Desastroso	Muitas Mortes	Perda de toda a rede de Bombagem
4	Catastrófico	Múltiplas Mortes	Perda da instalação de Bombagem
3	Critico	Uma morte ou múltiplos feridos graves	Perda da função Bombagem
2	Marginal	Único ferido grave	Dano severo no sistema
1	Insignificante	Feridos sem gravidade	Dano menor no sistema

Tabela 2.3 – Exemplo de categorias de frequência da ocorrência para análise FMECA. Adaptado de (Carvalho, Medeiros, Madeira, & Cabral, 2022)

PN	CATEGORIA	FREQUÊNCIA DA OCORRÊNCIA (POR ANO)
7	Frequente	1 – 10
6	Provável	1×10^{-1} – 1
5	Ocasional	1×10^{-2} – 1×10^{-1}
4	Raro	1×10^{-3} – 1×10^{-2}
3	Remota	1×10^{-4} – 1×10^{-3}
2	Improvável	1×10^{-5} – 1×10^{-4}
1	Inacreditável	1×10^{-6} – 1×10^{-5}

Sendo que a análise das falhas no âmbito dos critérios definidos permitirá finalmente chegar a um grau de severidade segundo um critério a definir (exemplo: Falha significativa; Falha maior; Falha menor) que permitirá perceber quais são os sistemas mais críticos, e como é que deverá de ser a nossa estratégia de manutenção para eles.

A realização do FMECA permite perceber de uma forma analítica quais é que são os modos de falha com as piores consequências: podem ser não só aqueles com a maior taxa de falha como também podem ser aqueles com fiabilidade incerta, ou que são componentes chave para o funcionamento do equipamento, ou até mesmo porque apenas são fabricados numa determinada marca, sendo que depois é preciso definir as operações de manutenção que permitam minimizar ou evitar a ocorrências de falhas.

2.3 Estratégia de manutenção

Tendo definido os vários modos de falha que podem afetar um equipamento, é preciso definir uma estratégia de manutenção para o combate e minimizar o seu impacto. Os tipos de estratégias de manutenção mais utilizados são, a manutenção corretiva planeada, a manutenção preventiva sistemática, e a manutenção condicionada.

Na manutenção corretiva planeada, apenas se faz manutenção sobre o componente quando este falhar ou seja não é realizada nenhuma manutenção que possa reduzir o seu risco de falha, salvo a realização de testes para verificar o seu correto funcionamento; este tipo de manutenção é o mais indicado para componentes onde a criticidade de falha é reduzida e logo não compensa o custo de realização de tarefas de manutenção preventiva. A manutenção corretiva planeada é diferente da

manutenção corretiva imprevista, a primeira aplica-se quando é conhecido que o equipamento está em falha, mas ainda é possível ser operado até que sejam reunidas as condições necessárias para a realização da manutenção, já a imprevista é aquela onde é necessário a realização da manutenção de uma forma imediata e onde o equipamento se encontra inoperativo.

Na manutenção preventiva são realizadas periodicamente tarefas de manutenção programadas cujo objetivo é o de reduzir a probabilidade de o componente falhar, estas podem ser compostas, ou não, por tarefas que repõem parcialmente a fiabilidade do componente, mas no geral incluem uma substituição programada; este tipo de manutenção é indicado para componentes com uma criticidade de falha maior, mas cujos custos de manutenção preventiva sistemática não sejam muito elevados.

Na manutenção condicionada também são realizadas tarefas de manutenção preventivas, mas, ao contrário da estratégia anterior, estas não têm um planeamento fixo e a sua realização está dependente da análise da condição do componente. Esta análise é feita através de inspeções periódicas cujo objetivo é medir um conjunto de parâmetros que permitem aferir a condição dos componentes, e conforme é analisada a condição dos componentes, são enviadas tarefas de manutenção preventiva para repor parcialmente ou completamente a condição; este tipo de manutenção é indicado para componentes com uma criticidade da falha maior, mas cujos custos da realização das tarefas de manutenção preventiva sejam elevados (especialmente a substituição preventiva), ou seja, o objetivo é apenas fazer-se a manutenção preventiva quando for absolutamente necessário e tentar evitar ao máximo a falha. (Mobley, 2004)

É importante perceber que, consoante o tipo de estratégia utilizado para resolver ou evitar a falha, existem um conjunto de operações de manutenção a definir para esse efeito, e essas irão ter vários níveis de impacto em termos de custo de materiais, tempo de mão-de-obra, ferramentas a utilizar e a especialidade requerida do técnico que a irá realizar (por exemplo a realização de uma lubrificação como tarefa de manutenção preventiva, poderá ser necessário um técnico certificado para a realização dessa operação). Outra vertente a perceber é que para um plano de manutenção é importante que exista um certo sincronismo entre as tarefas, i.e., que um conjunto de tarefas sejam realizadas ao mesmo, por necessitarem do mesmo tipo de equipamento ou requeiram o mesmo tipo de acesso.

2.3.1 Estatística e Fiabilidade

A estatística tem como objetivo a caracterização de uma população ou universo estatístico a partir da análise de características quantitativas que lhes são associadas e que são designadas por variáveis estatísticas. Se considerarmos o tempo de falha de um componente um acontecimento elementar e assim um valor que pode ser assumido por uma variável estatística podemos perceber como é que podemos utilizar este campo científico para modelo da curva para a probabilidade de falha de vários tipos de componentes.

Sendo o objetivo da manutenção a reposição da fiabilidade de um equipamento, é necessário abordar um pouco o que é a fiabilidade. Nos termos mais simples, a fiabilidade é *“A probabilidade de um órgão funcionar satisfatoriamente (ou cumprir a função requerida) durante um certo intervalo de tempo (ou missão) sob condições especificadas”* (Assis, Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão

de Ativos Físicos, 2014). E como se percebe pela definição a fiabilidade é descrita como uma probabilidade de um equipamento operar até a um certo ponto sem falhar, e por isso podemos descrever a fiabilidade de componentes através de distribuições estatísticas.

Para podermos calcular a fiabilidade global de um determinado equipamento temos de perceber as funções dos seus diversos componentes. A fiabilidade global é a probabilidade de um equipamento operar até a um certo ponto ficar inoperativo, sendo que este estado de falta de operabilidade poderá acontecer devido a uma falha num dos seus componentes. No entanto, a falha de um componente pode não significar que o equipamento falhe, aliás existem equipamentos com sistemas redundantes que, caso um dos componentes falhe, o equipamento continua a trabalhar pois o outro ainda está operacional. Diferenças na estrutura do equipamento significa diferenças nos cálculos da fiabilidade global.

No caso mais simples, como o da Figura 2.2, temos um equipamento com 3 componentes todo em série, se considerarmos a fiabilidade individual destes componentes R_1 , R_2 , e R_3 respetivamente então o cálculo da fiabilidade global R_g fica:

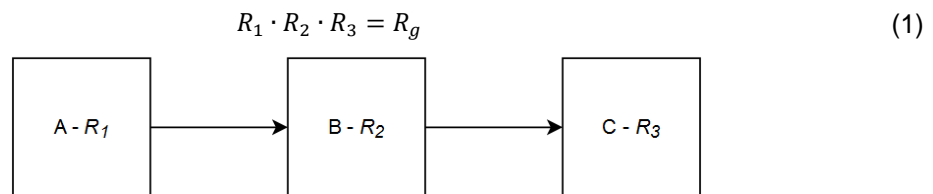


Figura 2.2 - Equipamento com três componentes em série.

Neste caso o cálculo da fiabilidade é direto, e se um dos equipamentos falhar a sua fiabilidade passa a ser zero, logo a fiabilidade do equipamento também passa para zero resultando numa situação em que o equipamento falhou. Caso contrário, se tivermos um equipamento como o da Figura 2.3, constituído por 3 componentes todos em paralelo e com a fiabilidade de cada um a ser dada por R_1 , R_2 , e R_3 respetivamente então o cálculo da fiabilidade global R_g fica:

$$1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot (1 - R_3) = R_g \quad (2)$$

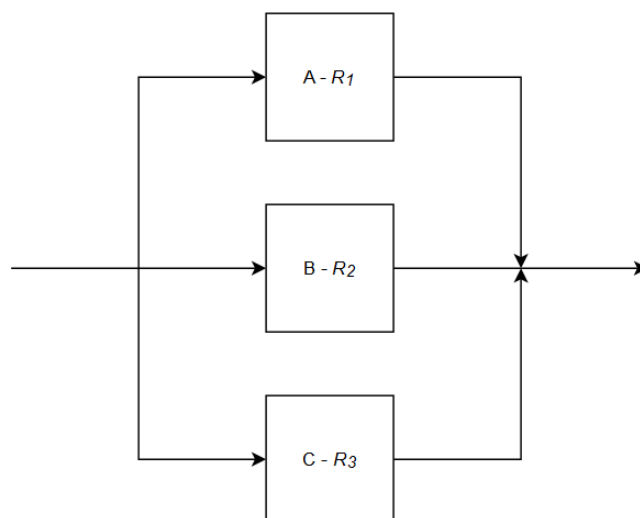


Figura 2.3 - Equipamento com três componentes em paralelo.

Neste caso o cálculo da fiabilidade não é direto, isto porque o equipamento só fica inoperativo quando todos os três componentes falharem, por isso, sabendo que $R + F = 1$, onde R é a fiabilidade e F é a falha, podemos calcular a falha global deste equipamento através de:

$$F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 = F_g \quad (3)$$

Onde F_1 , F_2 , F_3 , e F_g são as falhas de cada equipamento e a global respetivamente. Desta forma podemos perceber que quando os componentes do equipamento estão todos em paralelo a falha só chega a 100% quando tiverem falhado todos os três.

Existem muitas mais configurações que poderiam ser abordadas, mas aqui o objetivo é dar a perceber que consoante o tipo de estrutura do equipamento a analisar, iremos ter planos de manutenção completamente diferentes.

2.3.2 Distribuições de apoio à Manutenção

Para relacionar a estatística com os conceitos de manutenção vão ser apresentadas diversas distribuições. Uma distribuição é uma expressão matemática que descreve a probabilidade de um sistema ter um determinado valor, e assim permite a modelação de vários eventos reais de uma forma matemática (The Editors of Encyclopaedia Britannica, s.d.). Para a situação da presente dissertação serão utilizadas as distribuições para a modelação são só da fiabilidade dos componentes, como também para modelar os tempos para a realização das ações de manutenção. Das várias distribuições muitas poderiam ser utilizadas para modelar a evolução da fiabilidade de um componente, mas nos próximos subcapítulos iremos apenas focar naquelas utilizadas para noo algoritmo criado.

2.3.2.1 Distribuição de Weibull

Sendo uma das distribuições mais utilizadas para a modelação da fiabilidade, a distribuição de *Weibull* é uma distribuição que recorre a três parâmetros para a sua modelação. Os parâmetros que caracterizam esta distribuição são:

- O parâmetro de escala, β (*também chamado de vida característica*);
- O parâmetro de forma, α ;
- O parâmetro de localização, t_0 ;

Sendo a sua função densidade, $f(t - t_0, \beta, \alpha)$, é dada pela equação (4) e a sua função acumulada, $F(t - t_0, \beta, \alpha)$, é dada pela equação (5).

$$f(t - t_0, \beta, \alpha) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left[\frac{t - t_0}{\beta} \right]^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4)$$

$$F(t - t_0, \beta, \alpha) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \quad (5)$$

Ou seja, no contexto de falha e fiabilidade, $f(t - t_0, \beta, \alpha)$ é a função densidade de falha e $F(t - t_0, \beta, \alpha)$ é a probabilidade acumulada de falha.

No Anexo I apresenta-se um exemplo que permite visualizar uma metodologia para a obtenção das curvas da falha conforme a distribuição de *Weibull* para um determinado componente a partir dos seus dados de falha. (Assis, Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos, 2014)

2.3.2.2 Distribuição Normal

Outra distribuição será utilizada é a normal. Esta função descreve bem a falha de um componente nos casos onde temos uma maior degradação. Ela é caracterizada por dois parâmetros: a média μ (parâmetros de localização); e a variância v ou σ^2 . A curva de densidade de falha dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t-\mu)}{\sigma} \right]^2} \quad (6)$$

E a curva da probabilidade acumulada de falha dada por:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t-\mu)}{\sigma} \right]^2} \quad (7)$$

Esta distribuição será utilizada no algoritmo para simular os tempos de manutenção para os casos da manutenção preventiva. (Assis, Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos, 2014)

2.3.2.3 Distribuição Exponencial Negativa

A distribuição exponencial negativa é outra distribuição que é utilizada pelo algoritmo. É um caso particular da distribuição de *Weibull* quando $\alpha = 1$ e $t_0 = 0$. Neste caso $\beta = 1/\lambda$. Onde é mais ideal aplicar esta distribuição é em casos onde a falha é resultado de um evento inesperado que pode acontecer em qualquer ponto do tempo, por exemplo o entupimento de uma bomba de água devido à entrada de detritos demasiado grandes. Assim, esta função apenas é descrita pela taxa de falhas média λ . A curva de densidade de falha dada por:

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (8)$$

E a curva da probabilidade acumulada de falha dada por:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (9)$$

Esta distribuição será utilizada no algoritmo para simular os tempos de manutenção para os casos da manutenção corretiva. (Assis, Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos, 2014)

2.3.3 Disponibilidade

Tendo abordado fiabilidade existe um critério muito importante para perceber se o plano é viável ou não. Se assumirmos que temos um sistema composto por 5 componentes, cada um com a sua fiabilidade, podemos imaginar um simples plano de manutenção. Nos termos mais simples podemos dizer que o nosso sistema vai operando até que chega a um tempo t_1 onde acontece uma falha, que demora t_2 a resolver, passado um tempo t_3 de operação o sistema volta a ter uma falha que demora t_4 a resolver, e assim sucessivamente, conforme a Figura 2.4.



Figura 2.4 - Esquema de operação e falha de um equipamento. A verde o sistema está operacional, a vermelha está reparação devido a falhas.

Se ainda considerarmos que dentro dos períodos de operação do sistema existem paragens para a realização de ações manutenção preventivas podemos ter uma linha de tempo mais complexa como a da Figura 2.5.



Figura 2.5 - Esquema de operação, ações preventivas, e falha de um equipamento. A verde o sistema está operacional, a vermelha está reparação devido a falhas e azul está parado para manutenção preventiva.

Existem dois parâmetros que vamos utilizar para definir a disponibilidade: um é o *MTTM*, ou *Mean Time To Maintenance*, calculado somando a quantidade de tempo que teve a operar num determinado período t , e depois dividir o total pelo número intervalos que o sistema esteve a funcionar; o outro é o *MTTR_{c+p}*, ou *Mean Time To Repair or Replace*, calculado somando o tempo que o sistema esteve em manutenção (preventiva e corretiva) e dividindo o total pelo número de intervalos que este sofreu a dita manutenção, neste parâmetros estamos a combinar o *MTTR_c* onde apenas contam os tempos de manutenção corretiva, e o *MTTR_p* onde apenas contam os tempos de manutenção preventiva. Podemos calcular a disponibilidade D , através da seguinte fórmula:

$$D = \frac{MTTM}{MTTM + MTTR_{c+p}} \quad (10)$$

Analisando a equação (10) verifica-se que quanto maior a fiabilidade maior será o *MTTM*, e maior será o *MTTR_p* para manter o nível de fiabilidade seja mantida desejado (através de ações de manutenção preventiva); da mesma forma quanto maior a manutibilidade, que será abordada no subcapítulo seguinte, menor será o *MTTR_c*, assim encontrar o balanço em um sistema muito fiável e um com rápida manutenção é a chave para a criação de planos de manutenção ótimos. No algoritmo desenvolvido apenas dar-se-á foco a parte da fiabilidade, sendo que a manutibilidade estará de certa forma nos tempos de manutenção e nas distribuições a eles atribuídos.

2.3.4 Manutibilidade

Um equipamento muito fiável é um sistema onde podemos contar que ele trabalhe muito tempo até que ocorra uma falha, no entanto existe uma outra faceta que ainda não abordamos e esta é a manutibilidade. A manutibilidade é a capacidade de um equipamento ser mantido em boas condições operacionais e tal como a fiabilidade pode ser modelada por uma distribuição estatística e pode ser expressa em três pontos:

- Para um período de tempo t , qual a probabilidade de um sistema não necessitar de x ações de manutenção. Assumindo que este é operado dentro das suas condições pré-estabelecidas;
- Para uma ação de manutenção, qual a probabilidade de esta não ultrapassar n períodos de tempo t . Assumindo que estas são realizadas em condições pré-estabelecidas de procedimentos e de recursos;

- Para um período de tempo t , qual a probabilidade de a manutenção num sistema não custar mais de y . Assumindo que este é operado dentro das suas condições pré-estabelecidas;

Assim a manutibilidade de um equipamento é maior quanto mais fácil e rápida for a realização das ações de manutenção necessárias para repor a operacionalidade do mesmo quando acontece uma falha. Logo, este parâmetro é função do tempo de manutenção propriamente dito, o tempo de logística associado à disponibilização dos meios necessários para executar a intervenção e do tempo para as tarefas de gestão, nomeadamente o que medeia entre a deteção de uma falha e a notificação para intervir.

Algumas das distribuições que podem ser usadas para modelar a manutibilidade são: a Normal, que é ideal para reparações simples, frequentes e de curta duração; a exponencial negativa, que é ideal para equipamentos de complexidade média-alta e com falhas pouco frequentes; e a normal logarítmica, que não será aqui abordada e é ideal para equipamentos complexos, mas com falhas pouco frequentes e muitas operações elementares. (Assis, Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos, 2014)

2.3.5 Custo ciclo de vida

Quando se fala no custo de uma máquina não se deve apenas focar no investimento inicial de a adquirir porque este é apenas um custo tomado a curto prazo, como foi abordado nos vários capítulos anteriores existem muitos fatores que geram custos, tais como as falhas ou a manutenção preventiva. Muitas vezes uma máquina que tem um custo de aquisição mais barato terá custos de manutenção e reparação muito maiores, ou seja, o nosso custo inicial poderá ser menor, mas os custos a médio e longo prazo resultantes da exploração económica da máquina serão muito maiores. Assim quando escolhermos uma máquina a adquirir e queremos a opção mais económica não devemos olhar apenas para o investimento inicial, mas sim para o custo ciclo de vida. O custo ciclo de vida, *LCC* ou *Life Cycle Cost*, é composto por dois custos: o custo de propriedade, onde se incluiu o custo de aquisição do equipamento, o custo de manutenção do equipamento, e o custo de desativação ou eliminação do equipamento; o custo de operação, que está relacionado com os custos variáveis resultantes dos recursos utilizados na operação da máquina, tais como consumíveis, mão-de-obra, energia, etc...

Olhando para a evolução dos custos ao longo do tempo de vida de um equipamento pode-se observar um pico inicial, decorrente da aquisição do equipamento, mas depois ao longo do tempo temos dois custos que estão sempre presentes, os de manutenção e os de operação, que apesar de menores inicialmente, é muito provável que estes ultrapassem os custos de investimento à medida que o equipamento vai sendo explorado. Assim para a escolha do plano ótimo de manutenção é também termos de conseguir prever quais serão os custos que vamos ter durante a operação da máquina e jogar isso com a fiabilidade e disponibilidade objetivo.

Recapitulado, a metodologia proposta para a definição de um plano de manutenção é:

1. Estruturar o nosso equipamento em seus vários componentes, não só em termos quantitativos, mas também perceber se eles estão relacionados de uma forma paralela, em séria, etc...
2. Definir os modos de falha e perceber quais são aqueles com maior impacto negativo no equipamento, nos operadores, no ambiente, etc...
3. Definir quais são as operações necessárias para resolver a falha (manutenção corretiva) ou até mesmo evitar que esta aconteça (manutenção preventiva);
4. Definir uma fiabilidade mínima para cada componente, e com o auxílio das distribuições estatísticas, encontrar intervalos para as tarefas de manutenção que garantam que os componentes numa tenham uma fiabilidade abaixo da mínima;
5. Harmonizar a periodicidade das operações para através da definição de um intervalo base que permita enquadrar todas tarefas programadas e evite que alguma tenha um intervalo que cause uma diminuição na fiabilidade do equipamento inferior à mínima definida;
6. Calcular a fiabilidade global associada ao plano definido, ou seja, como é que a fiabilidade vai evoluindo ao longo do tempo. Perceber qual é que vai ser a nossa disponibilidade média durante a operação pretendida e se está é superior à objetivo. E perceber quais é que vão ser os custos que vamos ter durante a operação.
7. Comparar vários planos e encontrar aquele que seja melhor consoante os critérios de disponibilidade, fiabilidade e custos definidos.

2.4 Método de *Monte Carlo*

O objetivo da otimização de um plano é encontrar o ponto que tenha a melhor relação entre a fiabilidade total do sistema, a disponibilidade, e os custos. Na prática estamos à procura de um plano que maximize a fiabilidade e disponibilidade e que minimize os custos. Para conseguirmos encontrar esse ponto temos de conseguir simular um plano numa situação que seja o mais real possível. Um método que pode ser utilizado é o método de *Monte Carlo*. A melhor forma que existe para explicar a base deste método é através de um exemplo. No anexo II da presente tese apresenta-se a aplicação do método de *Monte Carlo* em *Microsoft Excel*, para a determinação da relação do volume ocupado por três retângulos presentes no interior de um retângulo maior.

A aplicação deste método à otimização de planos de manutenção significa pegar num determinado equipamento, assumir alguns valores fixos, como os custos por exemplo, gerar valores para a falha, e os tempos de manutenção, de acordo com as distribuições referidas em capítulos anterior e verificar como é que se comporta este equipamento, em termos de custos, evolução da fiabilidade e disponibilidade, quando lhe é aplicado um plano específico. Com isto conseguimos testar vários planos escolhendo um plano vamos verificar quais é que são os próximos X eventos (quer manutenção corretiva, quer manutenção preventiva), e corremo-lo numa simulação de *Monte Carlo* Y vezes, e depois repetimos isto para os Z planos que tivermos. Comparando os resultados podemos chegar ao plano ideal de acordo com os critérios desejados.

Obviamente, existem vários fatores a considerar, e mesmo fatores que inicialmente pudessem parecer fixos, como por exemplo custos, podem sofrer alterações ao longo do tempo logo para

termos um plano verdadeiramente ótimo, não só temos de registrar todos os eventos e parâmetros de interesse, também temos depois de atualizar o nosso cenário na simulação de *Monte Carlo* e voltar a correr as simulações para que possamos continuamente otimizar o nosso plano de manutenção. (Metropolis & Ulam, 1949)

3 Controlo de condição

Uma grande parte dos custos operacionais de um equipamento industrial estão relacionados com a sua manutenção, por isso ter um plano de manutenção otimizados permite conseguir uma redução nestes custos de manutenção, e ao mesmo tempo maximizar a disponibilidade do mesmo. No entanto, existem sempre situações que não conseguimos controlar e que podem levar ao acontecimento da falha, um equipamento está preparado para trabalhar num determinado conjunto de parâmetros de operação, mas não é possível garantir que isto aconteça, vão existir várias situações onde o equipamento é operado fora dos limites, quer voluntariamente, quer involuntariamente. Adicionalmente muitas causas para a falha vão para além do seu desgaste natural, podem acontecer devido a deficiências na conceção, no material, na construção, na instalação, na manutenção do dia a dia, na forma como é utilizado., Na Figura 3.1 podemos ver a curva típica para a falha de um equipamento, onde no *Wear In* a frequência das falhas é maior devido a algumas das situações mencionadas previamente (falhas na construção, na conceção, na instalação, etc...), e no *Wear Out* temos as falhas devido à degradação natural, esta curva pode subir mais ou menos depressa, consoante o tipo de operação e manutenção da máquina.

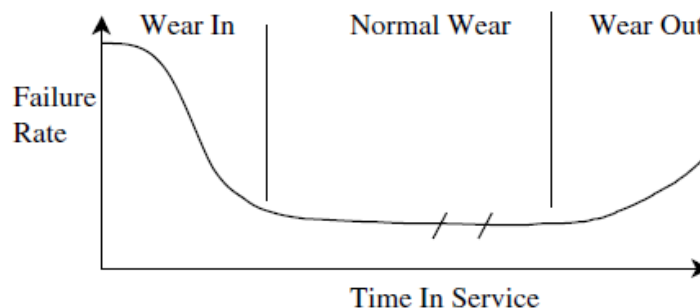


Figura 3.1 - Curva da banheira, descreve a evolução da probabilidade de falha típica de um equipamento. (Silva, 2005)

Quando um equipamento é instalado como novo, podemos dizer que este é um equipamento que não tem nenhum dano acumulado, no entanto durante a sua operação existem vários eventos que vão fazer com que exista acumulação de danos. Por exemplo o equipamento é operado em zonas onde as forças que lhe são aplicadas são maiores do que aquelas para que foi projetado, isto pode acontecer que o equipamento é forçado a operar com cargas superiores às recomendadas, ou quando é forçado a operar em zonas onde a frequência induzida é a mesma que a frequência natural da máquina, causando o fenómeno da ressonância e onde a coincidência das duas frequências resulta numa vibração exponencialmente maior e numa acumulação de dano elevada. Outro exemplo é a fadiga, que é uma acumulação de dano causada pela aplicação de cargas repetitivas abaixo da

tensão de rotura, algo que todos os equipamentos estão sempre sujeitos e algo que provoca uma acumulação gradual de danos. Esta acumulação de dano é possível ser observada através da medição de vários parâmetros indetificadores, como por exemplo a vibração. Sendo que a vibração é movimento cíclico e repetitivo de um objeto relativamente a um determinado ponto de referência estacionário.

Um equipamento no início da sua vida terá uma vibração menor do que a de um equipamento que já operou durante alguns anos. Adicionalmente podem-se detetar modos de falhas através da medição das vibrações de um equipamento. Por exemplo um determinado veio com uma hélice de três pás balanceada acoplada, se formos medir as vibrações neste sistema, e neste caso não só é possível observar uma maior vibração na zona de operação do veio, como também existirá uma maior vibração na zona de operação da hélice, cuja frequência é três vezes maior, dado a que a hélice tem três pás, e a maior vibração deve-se às batidas das pás. Se considerarmos que um dos modos de falha é a que uma das pás se encontra parcialmente partida poder-se-á verificar que existirá uma alteração das vibrações medidas, porque a pá danificada não só causa um desequilíbrio na rotação do veio, causando um aumento da frequência da vibração medida nessa zona de operação como também causa uma diminuição da força da batida das pás, e logo uma diminuição da frequência da vibração na zona de operação destas.

A ocorrência de uma falha prematura pode ser especialmente drástica em equipamentos onde o nível de manutibilidade é reduzido, pois uma falha mais severa pode necessitar que sejam gastos custos superiores e que seja necessário a paragem do equipamento por um período prolongado (exemplo: falha de um motor de uma aeronave, poderá ser necessário enviar o motor para reparação numa empresa certificada para tal, e poderá ser necessário a substituição de várias peças). Nestes casos é necessário algo mais do que o plano, é aqui que entra o controlo de condição. Esta área tem como objetivo a realização de inspeções periódicas num equipamento, e onde são feitas medições de vários parâmetros que permitem aos técnicos perceber a condição do equipamento (de certa forma perceber o estado de degradação do equipamento).

As inspeções à condição são bastante importantes pois permitem perceber se a evolução da degradação dos componentes está dentro daquilo que seria esperado, ou se é necessário realizar ações de manutenção por forma a repor parcialmente, ou totalmente, a fiabilidade do componente (visto que a diminuição da fiabilidade com o tempo pode ser entendida como uma aumento da degradação do componente), evitando assim que seja realizada manutenção preventiva desnecessária, ou que não seja realizada quando deveria, logo é uma ferramenta que pode ser utilizada para ajustar um plano de manutenção, pois pode permitir adiar ou atrasar as ações de manutenção consoante o necessário.

Neste subcapítulo será feita uma breve introdução ao controlo de condição, e a forma como esta área pode ser utilizada para medir a condição do componente. Para a medição da condição de um equipamento existem vários parâmetros que podem ser analisados, incluindo: dados de vibração; óleo; som; temperatura; inspeções visuais; partículas de desgaste; etc.... O principal foco deste subcapítulo será nos dados da vibração, pois é o que é utilizado no algoritmo. Dentro dos tipos de monitorização mais comuns, existe a monitorização periódica, onde é programada a recolha de dados

a cada período de tempo t (no algoritmo esta é a forma de recolha por defeito); e a monitorização continua, onde no equipamento está instalado um sistema automático de recolha de dados. Em termos de dados vibracionais existem várias formas de os recolher. Pode ser medida a vibração através do deslocamento; outra forma de medir é através da velocidade; e finalmente também pode ser medida através da aceleração, sendo que com este último por integração se pode obter a velocidade e o deslocamento.

Recolher os dados é um primeiro objetivo, outro é perceber como eles podem ser representados e posteriormente analisados. Os dois domínios de representação que serão aqui abordados são o domínio do tempo e o da frequência.

Começando com o domínio do tempo, este prende-se com a representação da análise de vibração em função do tempo, na Figura 3.2 apresenta-se um gráfico de medições ao nível da força e representadas no domínio do tempo.

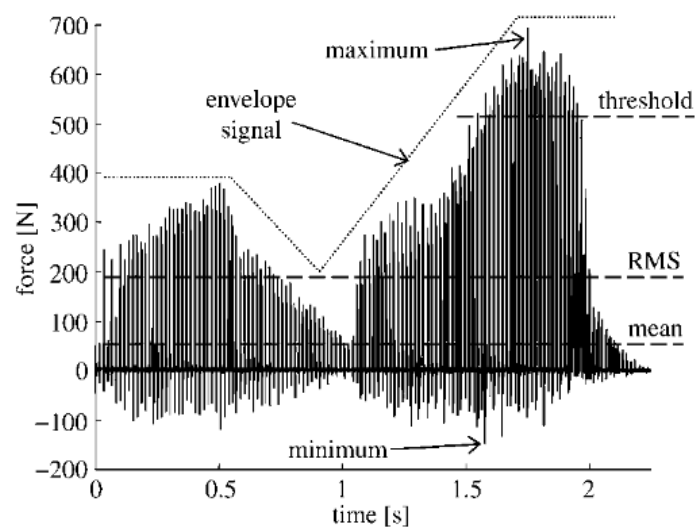


Figura 3.2 - Características simples de uma curva de dados no domínio do tempo. (Silva, 2005)

Formas que existem para analisar uma curva como esta são, o nível máximo da vibração, a média, *RMS Root-Mean-Square*, a amplitude pico-a-pico. Para passar para o domínio da frequência tipicamente é feito o processamento da informação ao nível do tempo através da transformação de *Fourier*. Na Figura 2.8 apresenta-se um exemplo de curvas de dados representadas no domínio da frequência.

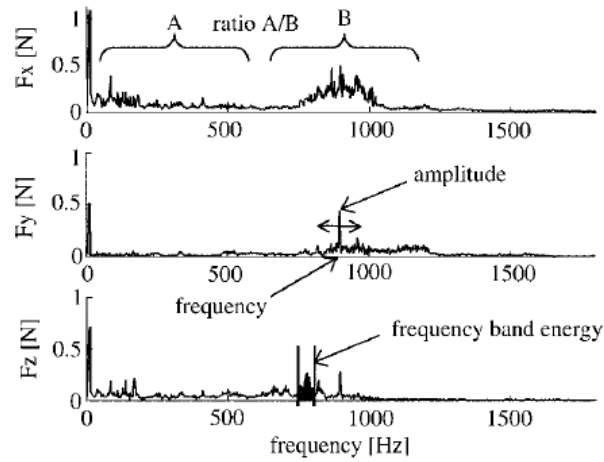


Figura 3.3 - Características simples de uma curva de dados no domínio da frequência. (Silva, 2005)

Tal como no do tempo, podemos analisar estas curvas através da amplitude máxima, da média aritmética, da média geométrica, e através de filtros baseados no RMS, mas também existem outros como a análise das gamas de frequência (último gráfico da Figura 3.3). Este último é especialmente interessante, pois num equipamento com vários componentes, permite contextualizar os diversos modos de falha em alterações características no espectro. Na Figura 3.4 apresenta-se a análise do espectro de um equipamento genérico em vários pontos. Através dessa análise é possível identificar em que zona do equipamento aconteceu a falha.

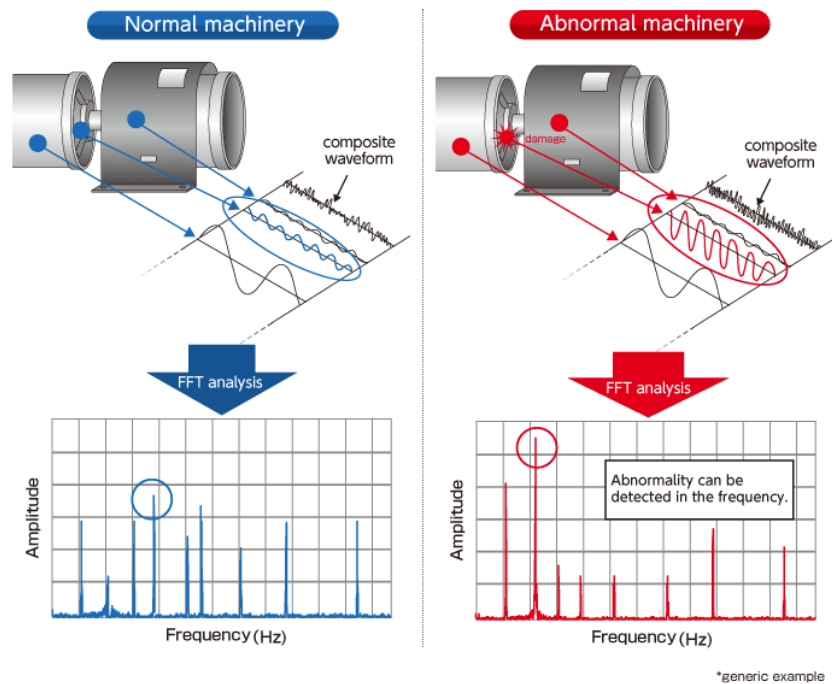


Figura 3.4 - Análise do espectro de um equipamento com funcionamento normal e com funcionamento degradado. Fonte: (Limble CMMS, 2021)

Com os dados recolhidos e tratados é necessário medir a degradação do componente. Normas, como a ISO, permitem ter uma aproximação para a definição de limites, como por exemplo

para a amplitude da vibração medida em deslocamento ou para o RMS da vibração medida em velocidade. Um exemplo encontra-se na Figura 3.5, onde foram definidas zonas para a amplitude de vibração (dependentes da velocidade de rotação).

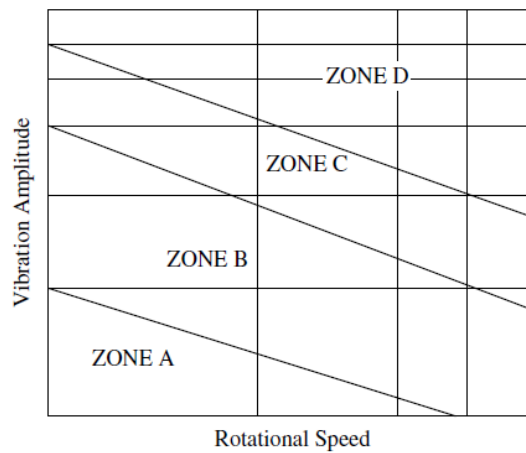


Figura 3.5 – Zona de avaliação, amplitude de vibração vs velocidade de rotação. (Silva, 2005)

Vibration Amplitude Increasing ↓	Vibration Severity for Separate Classes of Machines			
	Class I	Class II	Class III	Class IV
	A	A	A	A
	B	B	B	B
	C	C	C	C
	D	D	D	D

Figura 3.6. – Zona de avaliação, amplitude de vibração limite para vários tipos de máquinas. (Silva, 2005)

Onde a Zona A é para máquinas novas, a Zona B a vibração está aceitável, a Zona C é necessário monitorização, e a Zona D é onde a vibração é tão severa que existe um grande risco de estar a causar danos no equipamento e eventualmente levar à falha. A Figura 3.6 representa estas várias zonas para diferentes classes de máquinas, normalmente as máquinas aqui representadas têm a mesma finalidade, mas com contextos diferentes que justifiquem limites diferentes. Para além destas Zonas a ISO também define limites *ALARM* e *TRIP*, onde o primeiro indica que o valor da vibração chegou a um ponto que é necessário tomar ação, mas ainda pode ser operada a máquina enquanto se planeiam os trabalhos, o segundo indica que devem de ser tomadas ações imediatas e a máquina tem de parar operação enquanto não forem realizadas. Na Figura 3.7 temos o exemplo de medições feitas a uma máquina onde, assim que foi detetada a falha teve de ser feita uma reparação e de seguida foi realizada uma equilibragem dinâmica pois os valores da vibração estavam acima dos limites.

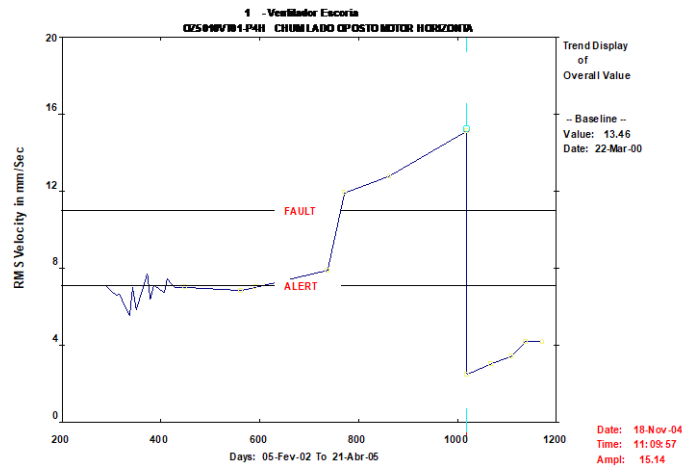


Figura 3.7 - Evolução de vibração e desenvolvimento de uma falha que necessitou de reparação. Fonte: MiiT-Informain¹

Assim, no contexto da fiabilidade temos como é que esta se vai degradando e qual o seu tempo de falha mais provável, ao mesmo tempo no controlo de condição temos a evolução da vibração ao longo do tempo logo é possível estabelecer uma relação entre os dois e permitir relacionar a fiabilidade do componente a um determinado tempo com a vibração esperada dele nesse tempo, e caso hajam diferenças na vibração o que isso significa para a fiabilidade.

Para podemos relacionar a evolução da fiabilidade com a degradação do componente, propõe-se considerar que a degradação de um componente, em termos do global de vibração, pode ser descrita por uma exponencial. No início a degradação evolui lentamente, e ao longo do tempo esta degradação piorando gradualmente mais depressa, semelhante ao comportamento de uma função exponencial. Uma exponencial pode ser dada pela seguinte equação:

$$D(t) = A \cdot e^{B \cdot t} \quad (11)$$

Podemos definir que D é o valor da degradação dado pela vibração global. Considerando os limites acima mencionados seria de esperar que quando a vibração atingisse o limite $TRIP$, que é o limite de vibração onde esta já começa a causar danos, a sua vida, em média, seria dada pelo $MTTF$, que na distribuição de *Weibull* é dada por:

$$\mu = t_0 + \beta \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (12)$$

Onde Γ é a função *Gamma*. Tendo isto em consideração, e que na vida zero podemos medir os valores de vibração global iniciais, podemos obter valores para os parâmetros A e B da função exponencial:

$$B = \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \right) / (t_1 - t_2)$$

$$A = d_2 / e^{B \cdot t_2} = d_1 / e^{B \cdot t_1} \quad (13)$$

Assim temos dois parâmetros que podemos comparar, a degradação esperada, d_e , obtida através da curva descrita acima para um determinado tempo t , e a degradação real, d_r , medida durante uma inspeção. Assim podemos dividir uma por outra para obter um fator de vibração f .

¹ Website da empresa: <https://miit-informain.pt/>

$$f = \frac{d_r}{d_e} \quad (14)$$

Se para um determinado componente com um fator de vibração 1 tiver um *MTTF* e uma determinada fiabilidade nesse *MTTF*, significa que para um fator de vibração diferentes teremos um *MTTF* diferente, mas para esse novo *MTTF* é possível modificar os parâmetros t_0 e β de *Weibull* através do fator de vibração por forma a que o componente no novo *MTTF* tenha a mesma fiabilidade que no antigo. Assim, nos planos de manutenção, podemos utilizar esta alteração nas curvas de *Weibull* para modificar os intervalos dos trabalhos de manutenção, visto que estes intervalos estavam baseados numa fiabilidade mínima desejada.

4 Método: O Algoritmo

Neste capítulo vai-se dar uma explicação do funcionamento geral do algoritmo desenvolvido em *Excel* para a criação dos planos de manutenção. Não será feita uma análise extensiva deste algoritmo, no entanto serão abordados as suas principais funcionalidades e os princípios por detrás destas.

Normalmente quando é adquirido um equipamento a um fabricante este já vem com um plano de manutenção já definido. No entanto, este plano poderá não se adequar à operação que se pretende ou poderá ter sido feito com base em condições diferentes daquelas que serão as suas reais. A utilização de planos de manutenção não otimizados irá resultar num aumento dos custos de manutenção, ou porque esta é feita de uma forma excessiva, ou porque está não é feita com a regularidade necessária, ou gera sobre custos não úteis ou gera falhas indesejáveis.

Para além dos custos diretos da manutenção, como o nível de manutenção executada no equipamento (quer preventiva, quer corretiva) pode não ser a ideal, isto significa um aumento dos tempos de inatividade (menor disponibilidade), e esta maior inatividade significa uma menor produção e subseqüentemente um menor nível de lucro.

Quando o plano de manutenção é não existente, ou é limitado a uma ou duas tarefas base a falha pode acontecer de uma forma imprevista e com consequências que poderão ser devastadoras. Em qualquer dos casos, é necessário primeiro analisar o equipamento de uma forma mais analítica, utilizando metodologias, como a apresentada no capítulo 2 da presente tese, para a estruturação do equipamento e identificação dos componentes com maior criticidade de acordo com a norma ISO 14224:2016 e com o FMECA, e para a criação um primeiro plano de manutenção, ou para validar o existente.

A utilização do algoritmo apresentado traduz-se na criação de um plano de manutenção ótimo, que é obtido através da adaptação do plano de manutenção inicial aos dados de falha vindos da utilização corrente do equipamento (ou de equipamentos iguais/semelhantes operados nas mesmas condições), que se expressam nas distribuições de *Weibull* conforme apresentado no capítulo 2. A esse plano de manutenção ótimo são depois acrescentados a informação relativa aos eventos presentes e a informação em tempo real vinda do controlo de condição, permitindo à segunda parte do algoritmo a criação de um modelo para o ajuste da solução anteriormente definida e assim conseguir manter a otimização desejada.

4.1 Modelo considerado

Por forma a se ter uma ideia relativamente ao funcionamento do algoritmo será apresentado um “modelo” de exemplo no qual serão realizadas as operações de otimização. Este sistema é composto por 5 componentes, sendo que cada um tem um tempo de vida expresso por uma distribuição de *Weibull* dada pelos parâmetros apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros dos componentes do sistema modelo.

	Componente A	Componente B	Componente C	Componente D	Componente E
β	9423,72	1108,62	10006,78	26143,27	10946,45
α	1,15	0,86	7,60	0,73	2,72
t_0 (h)	15775	4604	0	25839	18261

Onde β é o parâmetro de escala, α é o parâmetro de forma, e t_0 o parâmetro de localização. Estes parâmetros atribuídos a cada componente do sistema foram adaptados de um conjunto de relatórios mensais onde constavam os *MTBUR* (*mean time between unscheduled removal*), ou tempo médio entre remoções não programadas, de vários componentes que compõem um determinado modelo de aeronave. A principal razão para a utilização destes dados foi devido à sua disponibilidade e permitem construir um sistema “modelo” com base em dados reais. Apesar disto, o modelo utilizado tem apenas um propósito demonstrativo, servindo apenas para demonstrar o funcionamento do algoritmo. No anexo I consta o procedimento utilizado para a conversão dos dados nas respectivas curvas de fiabilidade.

Para o modelo em análise serão considerados dois tipos de tarefas preventivas, o primeiro são as substituições preventivas e os segundos são inspeções intrusivas com impacto na fiabilidade e de onde também se aproveita a ocasião para realizar medições das vibrações. Com base nos parâmetros de *Weibull* de cada componente é possível apresentar valores para os seus intervalos de substituição preventiva. Para as inspeções intrusivas os intervalos terão um valor fixo que é baseado no plano de manutenção inicial para as substituições preventivas.

Outro ponto importante a ter em consideração para o sistema em questão é que existe uma relação entre cada um dos seus componentes, no sentido em que quando é realizada a substituição de um dos componentes pode acontecer que também seja necessário a realização da troca de outros componentes. Para o sistema modelo, como se poderá observar na Tabela 4.2, apenas será considerada esta relação para o Comp. A e Comp. E.

Tabela 4.2 - Tabela de interação dos componentes.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Comp. A	N/A	0	0	0	0
Comp. B	0	N/A	0	0	0
Comp. C	0	0	N/A	0	0
Comp. D	0	0	0	N/A	0
Comp. E	0	0	0	0	N/A

4.2 Parâmetros

Tendo apresentado o modelo, vai-se agora mostrar os vários parâmetros considerados pelo modelo. Como já foi referido anteriormente, em termos de tarefas preventivas apenas contemplamos as duas mais relevantes para o estudo proposto: As substituições preventivas, para simular a substituição do componente quando a sua fiabilidade chega a um nível menor que o desejado, e as

inspeções intrusivas, para simular uma ação de manutenção com impacto na fiabilidade do componente e ao mesmo tempo como uma forma de obtenção da medição das vibrações e posterior impacto na fiabilidade dos componentes. Existem outros tipos de inspeções que também poderiam ter sido consideradas, como por exemplo inspeções visuais, limpezas, ou substituições de consumíveis, mas os contributos de tais inspeções para o estudo proposto seriam de pequeno impacto.

Os valores abordados acima têm uma importância para determinar a fiabilidade de cada componente e a fiabilidade geral do sistema, no entanto existem outros dois parâmetros deste nível que fazem parte do processo de decisão para a escolha do plano ótimo. Sendo estes os custos e a disponibilidade.

Para os custos estão considerados os seguintes parâmetros:

1. Os custos de aquisição de cada componente, quer este seja substituído de uma forma preventiva, quer seja de uma forma corretiva (por falha) e logo adquirido em regime urgente, o que causa um aumento do custo;
2. Os custos de mão de obra gastos na realização dos trabalhos, sendo que estes são diferentes para os trabalhos feitos num âmbito preventivo ou sejam feitos num âmbito corretivo;
3. Os custos de inatividade, resultantes da paragem da máquina para a realização dos trabalhos de manutenção;
4. E os custos dos consumíveis gastos durante as inspeções;

Para a disponibilidade estão considerados os seguintes parâmetros:

1. O tempo gasto tanto na realização da manutenção preventiva, como na realização da manutenção corretiva;
2. O tempo alocado para a realização de trabalhos de manutenção, ou seja, o tempo onde existe uma paragem programada;
3. Se o tempo de realização dos trabalhos de manutenção for maior que o tempo alocado para tal, então entramos num período de *downtime*, onde temos de ter em conta também o custo de não operação da máquina
4. A percentagem de tempo que cada componente funciona durante a operação da máquina;

Em termos de fiabilidade, para além da degradação natural dos componentes são também considerados fatores de degradação que são aplicados tanto após a realização de uma inspeção intrusiva, como após a substituição de um dos componentes. Este fator serve para introduzir um aumento de degradação ao componente causada por sobre manutenção. A aplicação deste fator é feita através da sua multiplicação ao valor do parâmetro t_0 do componente, o resultante é subtraído ao seu *TTF*, ou seja, o componente irá falhar mais cedo do que o previsto.

Para entrar com o controlo de condição apenas será entrado em consideração com um valor hipotético de vibração, que iremos considerar como o valor global de vibração para cada componente. Para o algoritmo, será assumido que os dados obtidos durante a realização das medições da vibração já foram tratados e que estes valores foram obtidos através da análise dos espectros nas gamas de frequência relevantes para o componente. Estes valores de vibração serão depois comparados com uma curva ideal sendo que a relação entre os dois irá resultar um fator de

vibração que poderá ter um impacto tanto positivo como negativo na vida do componente, que no algoritmo é refletido através do aumento ou diminuição dos intervalos de substituição.

Para o modelo utilizado pode-se encontrar na Tabela 4.3 os valores considerados para os custos, e na Tabela 4.4 os valores considerados para os tempos.

Tabela 4.3 - Custos de manutenção para o sistema modelo.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Custo Inspeção (€)	20	20	20	20	20
Custo Substituição Preventiva (€)	22000	6000	33000	16000	20000
Custo Substituição Corretiva (€)	44000	12000	66000	32000	40000
Custo Homem-hora (€)	50	50	50	50	50
Custo Homem-hora corretiva (€)	80	80	80	80	80
Custo Inatividade (€ / h)	312.5	312.5	312.5	312.5	312.5

Tabela 4.4 - Tempos de manutenção para o sistema modelo.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Tempo de Inatividade Inspeção (h)	1	1	1	1	1
Tempo de Substituição Preventiva (h)	3	2	1	3	4
Tempo de Substituição Corretiva (h)	30	20	10	30	40
Tempo alocado para manutenção (h)	4	4	4	4	4

Os valores utilizados para este modelo, apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, também se basearam em valores reais, o que permite ter uma visão mais real do plano de manutenção mais otimizado.

4.3 Modelação da falha

Para tornar a simulação fiel à realidade é necessário ter em consideração que os componentes de um determinado sistema vão, eventualmente, acabar por falhar, como tal é necessário arranjar uma forma de estimar o tempo de vida de cada componente, e assim perceber se este irá ser substituído devido às tarefas de manutenção preventivas ou se é devido à degradação do componente.

O método utilizado para prever o tempo a que o componente falha é, através da geração de um valor aleatório para a vida com base no inverso da função de *Weibull*. A razão para a utilização de valores aleatórios é porque vai ser utilizado o método de *Monte Carlo* para previsão do comportamento do plano de manutenção, isto será abordado em maior pormenor mais adiante. Recordado a equação (5) para a probabilidade acumulada de falha de um componente.

$$F(t - t_0, \beta, \alpha) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha}$$

Verifica-se que para a obtenção da nossa probabilidade de falha temos de saber qual é que é a vida do componente, e os parâmetros de *Weibull* da distribuição. Assim para a obtenção de um valor para a vida do componente temos de fazer o inverso, ou seja, através dos parâmetros de *Weibull* e do valor para a fiabilidade do componente na falha (recordando que a fiabilidade é o oposto da

probabilidade acumulada de falha), é possível a obtenção de vários valores aleatórios para a falha (Assis, EXCEL na Simulação de Sistemas e Análise de Risco).

$$TTF = t_0 + \beta * \left(LN\left(\frac{1}{1 - RAND()}\right) \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (15)$$

Onde *TTF* é o *Time To Fail*, ou seja, o tempo que o componente dura até falhar; t_0 , β , e α são os parâmetros de *Weibull*; e *RAND()* é uma expressão do *Microsoft Excel* cuja função é de gerar um valor aleatório de 0 a 1, distribuído uniformemente. Aqui está a ser utilizada a nomenclatura de *TTF* em vez de *MTTF* porque neste caso estamos interessados em obter vários valores do tempo até falhar e não de uma média. A razão para querermos vários valores será abordada daqui a pouco.

Usando este procedimento podemos calcular vários valores possíveis para a vida dos 5 componentes do modelo até à falha. Na Tabela 4.5 apresenta-se uma possibilidade para os valores de *TTF* de cada componente.

Tabela 4.5 – Alguns valores possíveis para o TTF dos componentes.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Valor Iteração 1 (h)*	23014,28	5845,11	9312,30	30473,14	29561,03
Valor Iteração 2 (h)	20194,10	5919,21	9411,43	40290,86	27635,17
Valor Iteração 3 (h)	20909,60	5235,67	9918,34	42556,27	26237,89
Valor Iteração 4 (h)	23560,72	5498,85	9167,94	41464,41	28262,37
Valor Iteração 5 (h)	22959,38	5112,06	8802,56	40278,456	26913,20
Valor Iteração 6 (h)	22196,82	4791,12	10202,58	32059,96	26404,06
Valor Iteração 7 (h)	23960,44	5133,97	9778,79	43618,94	27660,30
Valor Iteração 8 (h)	24698,55	5007,61	9505,30	51355,79	27098,37
Valor Iteração 9 (h)	20723,63	5536,13	9364,95	55086,30	27367,60
Valor Iteração 10 (h)	23616,11	5422,22	10726,59	37671,51	28760,34

*A iteração refere-se a um evento (uma inspeção, substituição preventiva ou falha)

Da mesma forma que são utilizados valores aleatórios para os valores de *TTF* dos componentes pois a falha de um componente nunca tem uma periodicidade fixa, também podemos considerar que os técnicos ao realizarem ações de manutenção nunca as fazem com a mesma periodicidade, logo temos de fazer um cálculo semelhantes para os valores da duração das tarefas de manutenção:

1. Para as inspeções utiliza-se o inverso da distribuição normal, com média igual aos valores apresentados na Tabela 4.4 e desvio padrão igual a um quarto da média;
2. Para as substituições preventivas utiliza-se uma distribuição normal, com média igual aos valores apresentados na Tabela 4.4 e desvio padrão igual a um quarto da média;
3. Para as substituições corretivas utiliza-se uma distribuição exponencial negativa, onde o parâmetro λ é dado pelo inverso das médias apresentadas na Tabela 3.4;

Através do *Excel* os valores para os tempos de manutenção são calculados da seguinte forma:

Para o inverso da distribuição normal (Assis, EXCEL na Simulação de Sistemas e Análise de Risco):

$$Tempo\ de\ manuten\c\c{o} = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi * \sigma}} * e^{\frac{(RAND() - \mu)^2}{2 * \sigma^2}} = NORM.INV(RAND(); \mu; \sigma) \quad (16)$$

Onde *NORM.INV* é uma função do *Excel* correspondente ao inverso da distribuição normal, μ é a média, e σ é o desvio padrão.

Para o inverso da distribuição exponencial negativa (Assis, EXCEL na Simulação de Sistemas e Análise de Risco):

$$\text{Tempo de manutenção} = \frac{-1}{\lambda} * LN(1/RAND()) \quad (17)$$

Onde λ é a média da função. Nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 apresenta-se um conjunto de valores possíveis para os tempos das inspeções, substituições preventivas, e substituições corretivas.

Tabela 4.6 – Alguns valores possíveis para as inspeções.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Valor Iteração 1 (h)	1,04	0,99	0,90	1,11	0,94
Valor Iteração 2 (h)	1,02	1,01	0,89	1,00	1,01
Valor Iteração 3 (h)	0,95	0,92	0,99	1,11	1,04
Valor Iteração 4 (h)	0,95	1,11	1,00	1,07	1,09
Valor Iteração 5 (h)	0,95	0,96	1,00	1,17	1,03
Valor Iteração 6 (h)	1,05	0,86	1,06	1,12	0,94
Valor Iteração 7 (h)	0,93	1,27	0,85	1,04	1,07
Valor Iteração 8 (h)	0,99	0,93	1,01	1,00	1,04
Valor Iteração 9 (h)	1,00	1,07	0,98	1,04	0,93
Valor Iteração 10 (h)	0,96	0,89	0,98	1,09	1,10

Tabela 4.7 – Alguns valores possíveis para as substituições preventivas.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Valor Iteração 1 (h)	2,77	2,19	0,95	3,15	4,38
Valor Iteração 2 (h)	3,14	2,28	0,97	3,16	3,63
Valor Iteração 3 (h)	2,94	1,97	1,02	3,07	4,10
Valor Iteração 4 (h)	2,89	1,81	0,84	2,89	4,08
Valor Iteração 5 (h)	3,01	1,91	0,93	3,43	3,69
Valor Iteração 6 (h)	3,10	1,97	0,91	2,75	3,63
Valor Iteração 7 (h)	3,41	2,05	0,92	2,99	3,90
Valor Iteração 8 (h)	2,94	1,96	0,93	3,03	4,18
Valor Iteração 9 (h)	2,69	2,00	1,06	3,35	4,47
Valor Iteração 10 (h)	3,15	1,40	1,04	3,07	3,82

Tabela 4.8 – Alguns valores possíveis para as substituições corretivas.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Valor Iteração 1 (h)	3,98	7,35	2,92	6,40	13,17
Valor Iteração 2 (h)	5,90	7,81	1,88	8,81	8,95
Valor Iteração 3 (h)	7,94	2,40	3,47	6,36	8,12
Valor Iteração 4 (h)	6,66	9,07	2,18	7,78	12,15
Valor Iteração 5 (h)	8,15	6,87	2,67	15,71	5,94
Valor Iteração 6 (h)	9,12	6,63	1,23	8,78	17,27
Valor Iteração 7 (h)	11,32	4,78	2,52	8,23	13,41
Valor Iteração 8 (h)	8,48	5,45	1,33	8,69	10,08
Valor Iteração 9 (h)	6,73	6,52	2,38	10,61	12,52
Valor Iteração 10 (h)	6,77	3,71	2,52	7,65	11,74

4.4 Plano de manutenção Inicial

Tendo sido apresentado os parâmetros que regem o funcionamento do algoritmo será agora iniciada a explicação do funcionamento do mesmo, resumidamente. O algoritmo é composto por duas secções: uma onde se realiza uma simulação inicial do comportamento dos sistemas, para vários intervalos base; e outra onde são introduzidos alguns dados relativos ao comportamento do sistema, especialmente em termos dos valores obtidos através da análise das vibrações, resultando na alteração continua do planeamento.

Conforme o nosso modelo apresentado podemos ou ter um plano de manutenção inicial ou associar os nossos parâmetros de *Weibull* e uma fiabilidade base desejada e obter valores para os tempos de substituição preventiva conforme a equação (15), onde em vez do *RAND()* introduzimos a fiabilidade desejada, e o resultado não será o *TTF* mas sim o intervalo entre as substituições. No segundo caso é necessário proceder à sincronização dos intervalos, ou seja, é necessário garantir que os intervalos são múltiplos uns dos outros, no primeiro poderá também ser necessário caso o nosso plano inicial não o seja, mas para tal acabará por ser necessário ter uma fiabilidade mínima garantida. Para sincronizar um plano de manutenção existente existem alguns pontos a levar em consideração:

1. A atribuição de uma fiabilidade mínima restringe os intervalos de substituição, pois estes não devem causar a remoção dos componentes quando a sua fiabilidade é menor do que a mínima, algo que pode acontecer pois com o sincronismo a fiabilidade dos componentes na substituição não é a mesma entre eles.
2. Tendo os intervalos de substituição e uma fiabilidade mínima, uma forma de sincronizar os intervalos é através da escolha de um componente *pivot*, isto é, um componente cujo intervalo de substituição inicial é fixado e a partir do qual podemos escolher os intervalos para os restantes componentes tendo em conta valores múltiplos do *pivot*. Como temos cinco componentes, é possível fazer-se intervalos considerando diferentes componentes *pivot*.
3. Como existem vários valores de intervalos múltiplos ao do *pivot* podemos aproveitar a fiabilidade mínima garantida para dizer que os intervalos dos restantes componentes não *pivot*, não só tem de ser múltiplos, como também são os maiores possíveis desde que não excedendo o requisito da fiabilidade mínima.
4. Existindo várias hipóteses para componentes *pivot*, uma forma de escolher o intervalo final é, por exemplo, dizendo que o intervalo desejado é aquele onde os intervalos resultantes são o maiores, desde que respeitem a fiabilidade global desejada .

Tendo o nosso plano de manutenção inicial escolhido podemos observar como é que este evolui no tempo. No algoritmo é feito através de eventos, sendo que cada evento corresponde à realização de uma tarefa de manutenção. Esta primeira abordagem é feita na primeira fase do algoritmo, iniciando-se com primeiro evento, que difere um pouco dos restantes pois este evento marca o início do tempo. Assim é realizada a inicialização dos componentes, ou seja, vão ser gerados valores de *TTF* a primeira vida de cada componente. Depois deste primeiro passo tem de ser primeiro identificado qual o primeiro evento que vai ocorrer, podendo ser este devido a uma manutenção

preventiva ou devido a uma manutenção corretiva. Para tal serão comparados os tempos até à próxima inspeção, os tempos até à próxima substituição preventiva e os tempos até à próxima substituição corretiva. Como exemplo apresenta-se a Tabela 4.9 para um plano de manutenção inicial.

Tabela 4.9 – Valores de inicialização do algoritmo.

	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Primeira vida (h)	26229	5062	8989	72472	28463
Próxima substituição (h)	16000	4000	8000	32000	16000
Próxima inspeção (h)	4000	1000	2000	8000	4000

Como se pode perceber da tabela anterior os primeiros eventos serão normalmente inspeções, pois são aquelas que têm o menor intervalo. Quando é feita uma ação de manutenção existem vários valores de termos de custos e de tempo a ter em conta, não sendo possível saber ao certo quando tempo vai demorar o técnico a realizar a ação de manutenção para efeitos de simulação, temos de recorrer aos valores aleatórios gerados pelas distribuições como se referiu anteriormente, sendo estes valores obtidos através da fórmula (16). Este tempo é importante pois permite perceber:

1. Quanto tempo demorou realizar a inspeção;
2. Caso esse tempo tenha excessivo o tempo de alocado à manutenção, quanto houve de inatividade (*downtime*).
3. Qual foi o custo homem-hora resultante;
4. Qual foi o custo de inatividade resultante;
5. Quais foram os custos materiais da inspeção;
6. Qual foi o custo total da ação de manutenção (que é a soma dos três custos anteriores);

Sendo também importante gravar quais vão sendo os custos manutenção acumulados dos vários eventos que vão ocorrendo.

Quando temos uma substituição preventiva ou corretiva, para além dos valores mencionados nos parágrafos anteriores, é preciso também ter atenção que a remoção de um determinado componente pode também implicar que sejam substituídos outros componentes devido à interação entre eles. Adicionalmente, a substituição de um componente também significa que o novo componente terá um *TTF* diferente daquele de saiu, logo é necessário recorrer à fórmula (15) para ir buscar novos valores. Em relação aos valores para os tempos de manutenção, para caso o evento seja uma preventiva usa-se a fórmula (16), caso seja corretiva utiliza-se a (17), para efeitos de controlo do stock dos componentes, é também importante gravar a quantidade discriminada de componentes que vão sendo removidas.

Outro ponto a ter em consideração é que a realização das ações de manutenção referidas anteriormente vai causar uma degradação na vida do componente, nas substituições devido processo de instalação, e as inspeções intrusivas visto haver uma interação física com o componente (a medição de vibração por si só não causa degradação, mas considera-se que é feita a medição durante uma inspeção intrusiva). Para entrar em consideração com estas degradações vamos agir sobre os parâmetros de *Weibull*, dos três parâmetros α , β e t_0 o último é o que define um tempo de

vida antes do qual não é expectável que o componente falhe, logo se houver uma degradação do componente podemos dizer que esta atua sobre o t_0 , o que, como consequência, faz com que a curva de *Weibull* se desloque para a esquerda, ou seja, o nosso componente vai falhar mais cedo. Se consideramos o fator de degradação como uma percentagem do t_0 então quando acontece uma degradação o novo t_0 é calculado da seguinte forma:

$$t_{0\text{ novo}} = t_{0\text{ atual}} * (1 - \text{fator de degradação}) \quad (18)$$

Nota que a degradação é uma percentagem do t_0 atual e não do t_0 de origem, e temos de ter isso em consideração quando tivermos componentes que sofreram várias ações de manutenção.

Traduzindo isto numa redução do *TTF* temos então:

$$TTF_{\text{novo}} = TTF_{\text{atual}} - \text{fator de degradação} * t_{0\text{ atual}} \quad (19)$$

Percebendo a forma como são tratados os eventos das inspeções, substituições preventivas, e substituições corretivas, é necessário criar uma sequência de vários eventos, (no caso do algoritmo são 500), por forma a permitir criar uma linha no tempo onde se mostra a evolução do modelo e que permita perceber as diferenças resultantes da aplicação de diferentes intervalos.

4.5 Optimizador

Nesta secção será feito um pequeno resumo relativamente ao funcionamento do optimizador utilizado pelo algoritmo, e a forma como este calcula o plano de manutenção ótimo.

Com um plano de manutenção inicial, sincronizado ou não, é necessário então chegar ao nosso plano otimizado, através do cálculo do intervalo para o qual a realização das substituições base têm a melhor relação custo/disponibilidade. Sendo que este cálculo não só depende do equipamento que queremos analisar, como também de parâmetros de fiabilidade mínimos objetivos, e posteriormente da análise dos resultados para se perceber qual é efetivamente o nosso plano de manutenção desejado.

O princípio que está por detrás da otimização é o método de *Monte Carlo*. Neste caso em vez do cálculo de volumes relativos dos retângulos através de valores aleatórios (conforme apresentado no anexo II), são utilizados os valores aleatórios para a geração de *TTF* e *TTR* (*Time to Repair*), para permitir pegar num determinado plano de manutenção, e não só perceber como é que ele se comporta com os valores ao longo de 500 eventos como também correr esses eventos várias vezes (pois cada vez que se corre os valores aleatórios serão diferentes, e logo os eventos serão também diferentes) e finalmente se chegar a quais serão os valores de disponibilidade e custos espetáveis se utilizarmos o plano de manutenção analisado no nosso modelo, o que no anexo II são as áreas relativas dos retângulos. Para chegarmos ao nosso plano ótimo temos de repetir este procedimento para vários planos, sendo que estes planos têm de respeitar determinadas regras, como por exemplo o sincronismo das ações de manutenção. Se considerarmos que temos uma gama de valores de fiabilidade mínima, podemos criar planos de manutenção para esses valores de fiabilidade, conforme explicado anteriormente através do inverso da distribuição de *Weibull* fórmula (15), aos quais é feita a sincronização dos planos. Assim, para cada plano que se criar este tem de ser testado ao longo de vários eventos e várias corridas, sendo que no final é possível escolher o plano de manutenção

ótimo, como sendo aquele cujos custos e a disponibilidade espetáveis são as mais vantajosas. A metodologia proposta por este documento utiliza um maior número de eventos, mas um menor número de corridas, no entanto é importante referir que para se obter resultados mais em conformidade com o real é necessário utilizar uma maior quantidade de corridas (não se propõe um número concreto).

É importante também referir que não é correto fixar um determinado número de eventos, pois as várias diferenças entre os intervalos de manutenção, especialmente se também forem consideradas as inspeções, resultarão em tempos de operação diferentes, algo que dificulta a comparação dos planos, pois um plano com menor tempo operacional em princípio terá menores valores de custos. O que se propõe é que seja definido um determinado tempo de operação para o equipamento, e que o número de eventos utilizado seja suficiente para cobrir esse tempo. Qualquer evento que esteja fora do tempo de operação deverá ser ignorado.

4.6 Controlo de condição

Na segunda parte do algoritmo é onde entra em consideração os dados do controlo de condição relativos ao estado dos componentes, tendo em conta este aspeto é necessário introduzir um novo tipo de substituição preventiva devido ao controlo de condição. Este tipo de substituição não depende de um intervalo ficado no tempo, mas sim do estado de degradação do componente, critério este que dependerá se o valor de vibração acima é ou não superior a um critério pré-estabelecido.

A vantagem que temos em utilizar estes dados de vibração é que a partir destes podemos perceber quando é que irão falhar os componentes do sistema. Assim sendo, o interesse desta segunda parte do algoritmo não é a aplicação do método de Monte Carlo para a otimização do plano de manutenção, mas sim o ajuste de um plano de manutenção otimizado conforme os dados de vibração. Logo, em vez de se utilizarem dados simulados, são utilizados os dados reais dos eventos para definir quais é que são as próximas ações de manutenção e para recolher os dados relativos às falhas dos componentes e a evolução da sua degradação.

4.6.1 Obtenção das curvas de previsão das vibrações

Num ambiente de simulação temos de ter em consideração a degradação dos componentes utilizando um fator de degradação, no entanto, quando passamos de um plano de manutenção otimizado para a sua aplicação num ambiente real esta degradação passa a ser entrada a ter em consideração. Esta degradação é obtida através dos dados vindos do controlo de condição, através de um fator de vibração relaciona a vibração medida com a vibração expectada. Mas é necessário perceber como é que se chega aos valores de vibração expectada, para que depois os possamos comparar os medidos. No capítulo 3 do controlo de condição, apresentou-se que se podia utilizar uma equação exponencial, fórmula (11), para descrever a evolução da degradação de um componente (através do valor global da vibração), e que para saber os parâmetros A e B da fórmula (11) precisamos dos valores iniciais da vida e vibração do componente e dos valores de vida e vibração para os quais se espera que o componente falhe.

Quando um componente é instalado no equipamento ele vem com uma vida inicial e com um valor de vibração que pode ser medido, mas para os valores que se espera que falhe temos de ir por

outros caminhos. É necessário ter um tempo médio de falha média, um *MTTF*, e para esse temos de saber qual é a vibração que esperamos ter.

O cálculo do *MTTF* pode ser feito através da fórmula (12), que será ajustada em termos de nomenclatura:

$$MTTF = t_0 + \beta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (20)$$

Já para os valores da vibração na falha, este tem de ser obtido através medições reais, algo que não se tem para o modelo, que não é de obtenção fácil para quem queria aplicar este algoritmo.

Visto isto temos de recorrer a valores padronizados. Como também foi referido no capítulo 3, existem diversas normas que têm como objetivo definir valores de vibração limite para diferentes tipos de equipamentos, sendo que aquele que será usado como referência para o algoritmo é o valor limite *TRIP* (que indica que devem de ser tomadas ações imediatas e a máquina tem de parar operação enquanto não forem realizadas), pois é aquele que mais se relaciona com a falha do componente. Para o caso da aplicação do modelo algoritmo será utilizado o valor 9,5 obtido de (ISO 10816, 2009). Na Figura 4.1 apresenta-se a tabela vinda da ISO 10816-7 de onde se retirou o valor de vibração limite.

Zone	Description (see 5.2 for details of zone definitions)	Vibration velocity limit r.m.s. value mm/s			
		Category ^a I		Category ^a II	
		≤ 200 kW	> 200 kW	≤ 200 kW	> 200 kW
A	Newly commissioned machines in preferred operating range	2,5	3,5	3,2	4,2
B	Unrestricted long-term operation in allowable operating range	4,0	5,0	5,1	6,1
C	Limited operation	6,6	7,6	8,5	9,5
D	Risk of damage	> 6,6	> 7,6	> 8,5	> 9,5
Maximum ALARM limit (= 1,25 times the upper limit of zone B) ^b		5,0	6,3	6,4	7,6
Maximum TRIP limit (= 1,25 times the upper limit of zone C) ^b		8,3	→ 9,5	10,6	11,9
<i>In situ</i> acceptance test	Preferred operating range	2,5	3,5	3,2	4,2
	Allowable operating range	3,4	4,4	4,2	5,2
Factory acceptance test	Preferred operating range	3,3	4,3	4,2	5,2
	Allowable operating range	4,0	5,0	5,1	6,1
For all acceptance tests in the preferred operating range (see 3.4), each of the filtered values ^c for rotational frequency (f_n) and blade-passing frequency ($f_n \cdot z_i$) should be		≤ 2	≤ 2	≤ 3	≤ 3
^a For definition, see 5.1.					
^b Recommended values. The vibration magnitudes should be above these limits for about 10 s before an ALARM or TRIP is released to avoid false alarms and trips.					
^c For acceptance tests in the allowable but outside the preferred operating range, the filtered values for rotational frequency (f_n) and blade-passing frequency ($f_n \cdot z_i$) may be expected to be higher (1,3 times) than the values for the preferred operating range.					

Figura 4.1 – Zonas limite para a vibração de bombas centrífugas com potência acima de 1 kW. Retirado de (ISO 10816, 2009)

A aplicação destes valores serve apenas uma aproximação inicial, até porque pode haver situações onde não existem valores padrão para as vibrações. Para depois se definir um valor de

vibração limite mais apropriado tem de ser ao longo de várias medições de vibrações dos diversos componentes onde será possível estabelecer a evolução real das vibrações ao longo do tempo.

4.6.2 Ajuste dos intervalos

Definidas as curvas de vibração temos então valores para a vibração expectada que podemos comparar com os valores medidos, logo, podemos obter o fator de vibração que indica o quão acima ou abaixo está a vibração do componente em relação ao que seria expectável.

$$fator\ de\ vibração = \frac{Vibração\ medida}{Vibração\ expectada} \quad (21)$$

Este vem substituir o fator de degradação atual sobre o t_0 da seguinte forma:

$$t_{0\ novo} = t_{0\ atual} / fator\ de\ vibração \quad (22)$$

. Que também será aplicada de forma semelhante para o parâmetro β da distribuição de *Weibull*, que é o parâmetro de escala:

$$\beta_{novo} = \beta_{atual} / fator\ de\ vibração \quad (23)$$

No entanto, visto não termos um novo *TTF* para calcular, temos de sim calcular um novo intervalo de substituição. Utilizarmos a fórmula (15) podemos considerar que um determinado intervalo é “afixado” a uma determinada fiabilidade do componente, logo em vez de estarmos a calcular um *TTF* para um valor aleatórios podemos utilizar o valor de fiabilidade “afixado” para calcular o novo intervalo através dos novos a parâmetros de *Weibull* vindos da fórmula (22) e (23)

$$Intervalo_{novo} = t_{0novo} + \beta_{novo} * \left(LN\left(\frac{1}{R(t)}\right) \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (24)$$

Se substituirmos o $\left(LN\left(\frac{1}{R(t)}\right) \right)^{\frac{1}{\alpha}}$ da equação (23) por $[Intervalo_{atual} = t_{0atual} + \beta_{atual}]$, ficamos que o novo intervalo pode ser calculado simplesmente através de:

$$Intervalo_{novo} = Intervalo_{atual} / fator\ de\ vibração \quad (25)$$

Através deste processo chegamos a uma forma de atualizar os intervalos substituição a partir dos valores da vibração medidos, podemos pegar num plano de manutenção otimizado e à medida que vamos introduzindo os eventos e medições reais podemos ir adaptando continuamente o plano de manutenção.

Um problema que surge com esta adaptação é que o nosso plano de manutenção vai se afastando do original, ou seja, vamos perder o efeito da otimização. Para resolver esta situação podemos introduzir os dados dos eventos que aconteceram e da condição atual dos componentes no algoritmo da simulação e voltar a correr o otimizador por forma a encontrar um novo plano de manutenção ótimo.

5 Resultados: Aplicação no modelo

Neste capítulo será aplicado o algoritmo para o modelo introduzido no início do capítulo anterior, serão apresentados os resultados obtidos, e será feita uma análise destes danos e a escolha do intervalo base ótimo.

5.1 Worksheet “SimuC”

Neste primeiro subcapítulo será aplicado o sistema modelo no *worksheet* “SimuC” do *Excel*, sendo que no próximo será aplicado no *worksheet* “Evolução”.

Primeiro, nas Tabela 5.1 e 5.2 serão apresentados todos os dados iniciais da simulação.

Tabela 5.1 - Dados iniciais da simulação relativos à manutenção componentes.

Tipo de manutenção	Descrição	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Substituição preventiva	Tempo de inatividade médio (h)	3	2	1	3	4
	Custo (€)	22000	6000	33000	16000	20000
	Margem (%)	10	10	10	10	10
	Fator de degradação (%)	98	98	98	98	98
Substituição corretiva	Tempo de inatividade médio (h)	30	20	10	30	40
	Custo (€)	44000	12000	66000	32000	40000
	Fator de degradação (%)	2	2	2	2	2
Inspeção	Tempo de inatividade médio (h)	1	1	1	1	1
	Custo (€)	20	20	20	20	20
	Margem (%)	10	10	10	10	10
	Fator de degradação (%)	2	2	2	2	2

Tabela 5.2 - Dados iniciais da simulação gerais.

	Descrição	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Tabela Interação	Comp. A	1	0	0	0	0
	Comp. B	0	1	0	0	0
	Comp. C	0	0	1	0	0
	Comp. D	0	0	0	1	0
	Comp. E	0	0	0	0	1
Weibull	β	9423,72	1108,62	10006,78	26143,27	10946,45
	α	1,15	0,86	7,60	0,73	2,72
	t_0 (h)	15775	4604	0	25839	18261
Geral	Custo homem-hora (€)	50	50	50	50	50
	Custo homem-hora corretiva (€)	80	80	80	80	80
	Custo inatividade-hora (€)	312,5	312,5	312,5	312,5	312,5
	Tempo alocado à manutenção (h)	4	4	4	4	4
	Funcionamento dos componentes (%)	100	100	100	100	100

Com os dados acima vai-se correr a simulação para um tempo de operação de 300000 horas. Para a definição da fiabilidade mínima do intervalo *pivot*, por forma a não se ter de correr o algoritmo para um elevado número de valores, vão ser utilizados, numa fase inicial, intervalos, entre as

fiabilidades mínimas, maiores que permitam perceber em que zona se encontram os valores para a substituição que permitiram criar o plano otimizado.

Para a primeira iteração será colocado um valor de fiabilidade mínima menor de 20%, até um valor de fiabilidade mínima maior de 100%, sendo que o programa vai percorrer estes valores com um intervalo de 20%.

Cada valor de fiabilidade mínima gera um conjunto de valores para os intervalos de substituição sincronizados e que são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores para os intervalos de substituição preventiva, iteração nº1.

	<i>Fiabilidade Mínima</i>	<i>Comp. A</i>	<i>Comp. B</i>	<i>Comp. C</i>	<i>Comp. D</i>	<i>Comp. E</i>
<i>Intervalo de substituição preventiva</i>	20 %	26120 h	6530 h	6530 h	52240 h	26120 h
	40 %	22400 h	5600 h	5600 h	44800 h	22400 h
	60 %	20440 h	5110 h	5110 h	20440 h	20440 h
	80 %	9580 h	4790 h	4790 h	19160 h	19160 h
	100 %	9200 h	4600 h	4600 h	18400 h	9200 h

Como se pode observar na Tabela 5.3 à medida que vamos aumentado a fiabilidade mínima teremos de ter intervalos de substituição menores. Podemos também observar casos onde existem saltos no valor do intervalo, estes saltos justificam-se pelo facto de os intervalos terem de assumir valores múltiplos e, por forma a garantir esta multiplicidade e ao mesmo tempo a fiabilidade mínima, terão de assumir um múltiplo diferente.

Correndo a simulação, com 500 eventos e 15 corridas, para os valores de fiabilidade mínima definidos vamos obter os valores apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores importantes para a análise do melhor intervalo, iteração nº1.

	<i>Fiabilidade Mínima</i>	20%	40%	60%	80%	100%
<i>Horas</i>	<i>Inatividade (h)</i>	1566,3	1268,2	997,7	660	525,4
	<i>Manutenção (h)</i>	2332,4	2111,5	1806,0	1502,2	1362,0
<i>Manutenção</i>	<i>Nº Falhas</i>	83	76	59	37	19
	<i>Nº Reparações</i>	83	76	59	37	19
	<i>Nº Substituições</i>	94	86	115	171	192
	<i>Nº Inspeções</i>	397	470	519	597	646
<i>Custo</i>	<i>Mão-de-Obra (€)</i>	171480	149988	122009	91482	76569
	<i>Inatividade (€)</i>	489469	396307	311766	206237	164192
	<i>Material (€)</i>	3491892	3719333	3778758	4317315	4294359
<i>Totais</i>	<i>Custos (€)</i>	4155889	4227437	4201695	4626622	45833343
	<i>Disponibilidade</i>	99,48%	99,59%	99,67%	99,77%	99,82%

Resumindo os dados observáveis na Tabela 5.4:

1. À medida que aumenta a fiabilidade, verifica-se uma redução no tempo de manutenção e no tempo de inatividade;
2. À medida que aumenta a fiabilidade diminui o número de falhas, mas aumenta o número de inspeções e substituições;
3. À medida que aumenta a fiabilidade diminui o custo de mão-de-obra e o de inatividade, mas aumentam os custos de materiais;

4. Nos valores correspondentes aos custos totais temos que os menores custos se encontram nos valores de fiabilidade menores, já os maiores custos encontram-se nos valores de disponibilidade maior;

Para o ponto 1. a diminuição no tempo de manutenção justifica-se dado que com o aumento da fiabilidade existem menos falhas, e conseqüentemente mais substituições preventivas, sendo que estas últimas, dada a sua natureza, têm menores impactos em termos de tempo manutenção e inatividade, pois as substituições preventivas demoram menos tempo a serem resolvidas.

Para o ponto 2. a diminuição do número de inspeções e substituições preventivas, e o aumento no número de substituições corretivas com o aumento da fiabilidade justifica-se dado que com uma melhor fiabilidade temos intervalos de substituição preventiva e de inspeções menores, logo o risco de falha diminui, mas em contrapartida, são feitas mais ações de manutenção sobre o componente ao longo das 300000 horas de operação. Na fiabilidade mínima a 100% apesar de, na teoria, não deveria haver falhas, na prática estas acontecem devido à degradação do componente, que acontece com realização das inspeções e das instalações dos componentes após uma substituição, tanto corretiva como preventiva.

Para o ponto 3. a diminuição nos custos de mão-de-obra e nos custos de inatividade justifica-se com a diminuição nos seus respetivos tempos, tal como discutido no ponto 1. Já para os custos materiais, estes estão relacionadas com a diferença de preços entre o componente adquirido em regime urgente, que acontece nos casos de falha repentina, e o componente adquirido em regime normal. Adicionalmente, seria necessário ter em conta outras questões, como por exemplo: a existência de material em stock, ou a facilidade em adquirir o material. No algoritmo considerou-se que o componente em regime urgente custaria o dobro do componente em regime normal, e nesta situação observa-se um aumento dos custos com o aumento da fiabilidade, isto significa que a diminuição no número de componentes adquiridos em regime urgente não compensa o aumento do número de componentes adquiridos em regime normal.

Para o ponto 4. a disponibilidade é calculada da forma:

$$Disponibilidade = \frac{Tempo\ de\ inatividade}{Tempo\ de\ operação + Tempo\ de\ inatividade} \quad (26)$$

E como, com o aumento da fiabilidade, o tempo de inatividade diminui (sendo que o tempo de operação é fixo), justifica-se o aumento da fiabilidade. Em termos de custos, estes têm em consideração os custos de mão-de-obra e inatividade, que vão diminuindo com o aumento da fiabilidade, e os custos de material, que têm a tendência a aumentar com o aumento da fiabilidade, finalizando nos valores da Tabela 5.4 que demonstram que os custos totais vão, geralmente, aumentando com o aumento da fiabilidade, que poderão ser melhor visualizado na Figura 5.1.

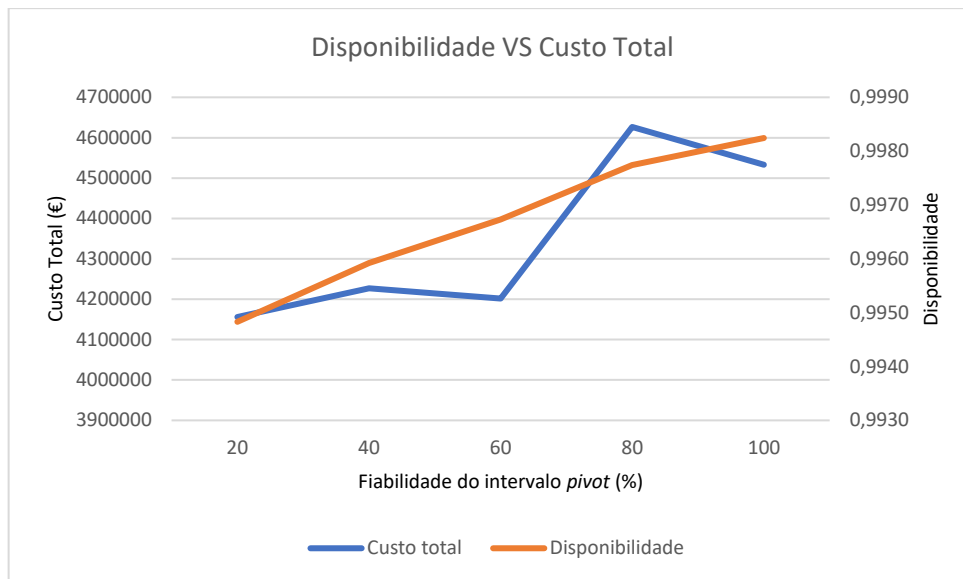


Figura 5.1 - Gráfico de comparação entre o custo total e a disponibilidade, iteração nº 1.

Comparando os vários valores, se apenas interessasse ter o custo menor, então, para o sistema em análise, o melhor seria utilizar os intervalos de substituição para valores de fiabilidade mínima menores. Mas como também é do interesse a parte da disponibilidade, pode-se considerar que o intervalo entre 40% e 80% merece ser analisado a maior pormenor.

Para a próxima iteração, colocou-se como valor de fiabilidade mínima menor 40%, e de fiabilidade mínima maior 80%, sendo que o intervalo será 5%. Correndo a simulação com 500 eventos e 15 corridas. Na Tabela 5.5 apresenta-se os resultados, sendo que se cortou os valores onde o custo total é maior.

Tabela 5.5 - Valores importantes para a análise do melhor intervalo, iteração nº2.

	Fiabilidade Mínima	45%	50%	55%	60%	65%
Horas	Inatividade (h)	1225,7	1106,0	1038,7	980,7	922,4
	Manutenção (h)	2070,9	1926,0	1849,1	1785,5	1708,6
Manutenção	Nº Falhas	74	66	62	59	54
	Nº Reparações	74	66	62	59	54
	Nº Substituições	90	106	110	114	122
	Nº Inspeções	478	505	512	519	523
Custo	Mão-de-Obra (€)	146288	132490	125991	1200461	113640
	Inatividade (€)	383030	345622	324609	306471	288244
	Material (€)	3754638	3779407	3757582	3767020	3790799
Totais	Custos (€)	4276044	4254719	4241100	4165743	4201149
	Disponibilidade	99,60%	99,64%	99,65%	99,68%	99,69%

Analisando os valores da Tabela 5.5 chega-se às mesmas conclusões que as da Tabela 5.4, mas consegue-se observar que existem uma zona onde o custo é menor sem um grande compromisso em termos de disponibilidade, esta zona situa-se entre os 55% e os 65%. Pode-se observar melhor esta zona na Figura 5.2.

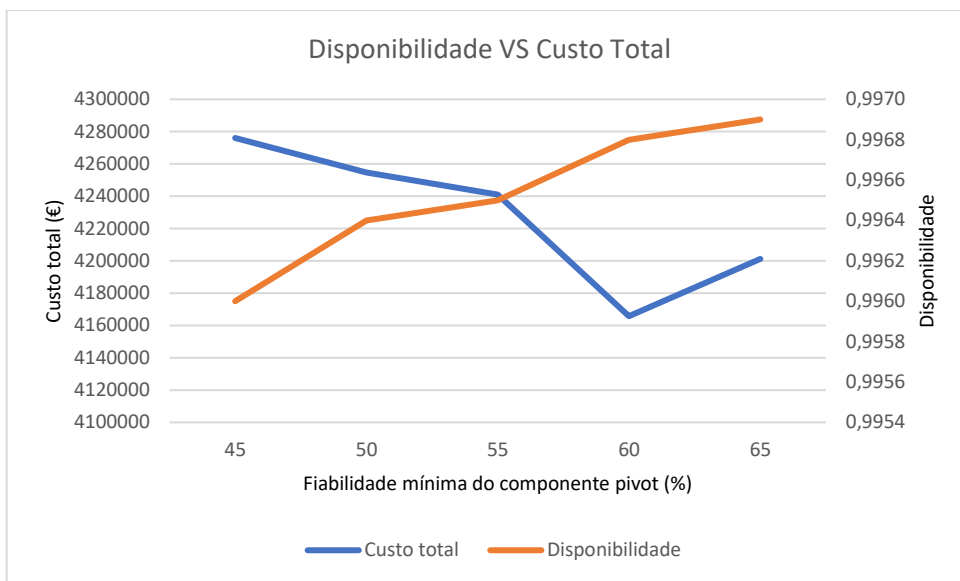


Figura 5.2 - Gráfico de comparação entre o custo total e a disponibilidade, iteração nº 2.

Para a terceira e última iteração colocou-se como valor de fiabilidade mínima menor 55%, e de fiabilidade mínima maior 65%, sendo que o intervalo será 1%. Novamente correndo a simulação para 500 eventos e 15 corridas.

Na Figura 5.3 representa-se o gráfico com os valores para o total dos custos e para a disponibilidade do sistema para os diferentes valores considerados entre 55% e 65%.

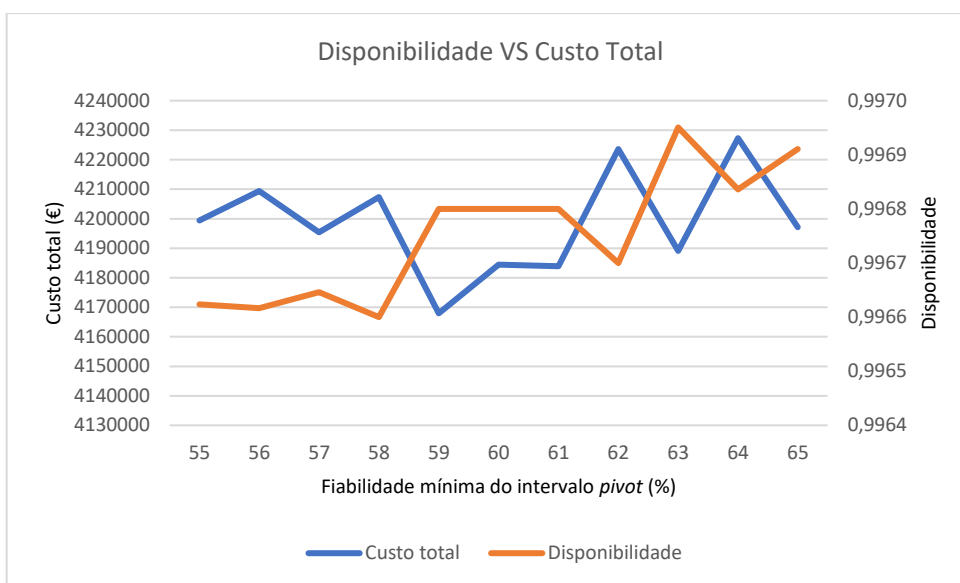


Figura 5.3 - Gráfico de comparação entre o custo total e a disponibilidade, iteração nº 3.

Como se pode verificar no gráfico da Figura 5.3, o plano de manutenção gerado para o valor de fiabilidade mínima de 59% será o ideal, apresentando o mínimo de custo com uma disponibilidade bastante elevada. Para suportar melhor esta escolha na Tabela 5.6 encontra-se o plano de manutenção gerado pelos valores de fiabilidade mínima de 58% a 62%, e na Tabela 5.7 encontram-se compilados os correspondentes dados mais importantes para os valores de fiabilidade mínima.

Da Tabela 5.6 podemos concluir que os intervalos são praticamente iguais, não havendo mudança nos múltiplos.

Tabela 5.6 - Valores para os intervalos de substituição preventiva, iteração nº3.

	Fiabilidade Mínima	Comp. A	Comp. B	Comp. C	Comp. D	Comp. E
Intervalo de substituição preventiva	58 %	20560 h	5140 h	5140 h	20560 h	20560 h
	59 %	20480 h	5120 h	5120 h	20480 h	20480 h
	60 %	20440 h	5110 h	5110 h	20440 h	20440 h
	61 %	20360 h	5090 h	5090 h	20360 h	20360 h
	62 %	20280 h	5070 h	5070 h	20280 h	20280 h
Intervalo de inspeção	58 %	5140 h	1285 h	1285 h	5140 h	5140 h
	59 %	5120 h	1280 h	1280 h	5120 h	5120 h
	60 %	5110 h	1277,5 h	1277,5 h	5110 h	5110 h
	61 %	5090 h	1272,5 h	1272,5 h	5090 h	5090 h
	62 %	5070 h	1267,5 h	1267,5 h	5070 h	5070 h

Tabela 5.7 - Valores importantes para a análise do melhor intervalo, 3ª iteração, a verde está assinalada a melhor opção.

	Fiabilidade Mínima	58%	59%	60%	61%	62%
Horas	Inatividade (h)	1002,8	997,8	1000,0	961,1	948,1
	Manutenção (h)	1805,8	1793,5	1804,5	1758,6	1750,8
Manutenção	Nº Falhas	60	59	59	57	57
	Nº Reparações	60	59	59	57	57
	Nº Substituições	113	114	114	117	119
	Nº Inspeções	517	518	519	519	521
Custo	Mão-de-Obra (€)	122171	121146	121934	118037	117238
	Inatividade (€)	313378	311812	312504	300345	296290
	Material (€)	3757963	3753204	3793118	3777805	3804450
Totais	Custos (€)	4207367	4167945	4184433	4183848	4223626
	Disponibilidade	99,66%	99,68%	99,68%	99,68%	99,67%

Através da observação da Tabela 5.7, poderia chegar-se à conclusão que o plano gerado pela fiabilidade mínima de 59% seria o melhor, no entanto podemos voltar a correr este intervalo para um maior número de corridas 200 corridas e para os mesmos 500 eventos por forma a confirmar esta escolha. Na Tabela 5.8 pode-se encontrar o resultado desta operação.

Tabela 5.8 - Valores importantes para a análise do melhor intervalo, 3ª iteração com 200 corridas, a verde está assinalada a melhor opção.

	Fiabilidade Mínima	58%	59%	60%	61%	62%
Horas	Inatividade (h)	1002,6	999,1	988,2	988,2	974,8
	Manutenção (h)	1810,2	1806,3	1793,0	1791,2	1775,1
Manutenção	Nº Falhas	60	60	59	59	58
	Nº Reparações	60	60	59	59	58
	Nº Substituições	122	114	114	116	118
	Nº Inspeções	517	519	519	520	520
Custo	Mão-de-Obra (€)	122588	122147	121013	120681	119263
	Inatividade (€)	313326	312209	308814	308804	304614
	Material (€)	3753238	3769875	3772714	3795896	3800308
Totais	Custos (€)	4192216	4202195	4185506	4214074	4224025
	Disponibilidade	99,67%	99,67%	99,68%	99,67%	99,68%

Observando os valores da Tabela 4.8 poderá se verificar que a melhor opção passou para a da fiabilidade mínima de 60%. Para as primeiras aproximações poderá não ser necessário um elevado número de corridas pois o propósito será ter uma ideia de onde é que se poderá situar o ponto ótimo. No entanto, para conseguir localizar o ponto com exatidão será necessário utilizar um maior número de corridas. Poder-se-ia voltar a correr o algoritmo com 1000 corridas para confirmar se realmente os 60% de fiabilidade mínima é o ideal, no entanto o propósito deste exercício é que demonstrar o funcionamento do algoritmo e não o de descobrir com exatidão com é o ponto ótimo. O cenário ideal será correr a otimização para um grande conjunto de valores de fiabilidade mínima do componente pivot e para um elevado número de corridas, seguindo sempre o tempo de operação desejado, no entanto o fator do tempo poderá ser uma limitação, daí a realização do procedimento anterior.

5.2 Worksheet “Evolução”

Neste subcapítulo será aplicado o modelo, cujos intervalos de inspeção e de substituição preventiva foram definidos no subcapítulo anterior na segunda parte do algoritmo, introduzido na *worksheet* “Evolução”. O algoritmo, neste *worksheet* seria, idealmente, testado num caso real, pois com o modelo não é possível obter dados sobre o controlo de condição nem sobre as falhas reais dos componentes, no entanto podemos, igualmente, ir buscar dados aos valores aleatórios para alimentar o sistema e verificar como é que este se compara com o algoritmo no *worksheet* “SimuC”.

Assim sendo será gerada uma lista de *TTF* para os componentes que será fixada, para a *worksheet* “SimuC” esta vai ser responsável pelos tempos de falha dos componentes, e na *worksheet* “Evolução” esta vai ser responsável pela definição das curvas de degradação dos componentes, que será comparada com a curva expectável para gerar os ajustes no plano de manutenção.

Numa primeira comparação não será considerada a degradação do componente com as ações de manutenção, tal aproximação justifica-se, pois, na *worksheet* “Evolução” é suposto serem utilizados dados verdadeiros e como tal esta degradação seria detetada durante a monitorização da condição do componente, ou seria analisada com os dados reais das falhas. Como estes dados não existem para o sistema modelo e queremos simular uma curva para o controlo de condição, podemos ignorar este aspeto da degradação.

Para demonstração geral do funcionamento do sistema serão simulados 20 eventos, podendo ser eles inspeções, substituições preventivas, e substituições corretivas. No início, haverá uma semelhança entre o modelo simulado pela *worksheet* “SimuC” e pela *worksheet* “Evolução”, mas à medida que entram os valores do controlo de condição, estes vão alterando os intervalos da segunda *worksheet* gerando discrepâncias nos eventos. Nas Tabelas 5.9 e 5.10 pode-se observar um resumo de todos os eventos simulados nas duas *worksheets*, sendo que os quadrados a verde são inspeções, os a laranja são substituições preventivas e os vermelhos são substituições corretivas.

Tabela 5.9 - Resumo dos eventos que ocorreram na simulação, *worksheet* "Evolução". Sem degradação dos componentes.

Nº evento	Tempo na escala do evento (h)	A	B	C	D	E
1	1277,5					
2	2555					
3	3832,5					
4	4535					
5	5110					
6	5110					
7	5812,5					
8	6387,5					
9	7090					
10	7665					
11	8367,5					
12	8925					
13	10202,5					
14	11480					
15	12757,5					
16	13220					
17	13220					
18	14035					
19	14497,5					
20	15312,5					

Verde: Inspeção; Laranja: Substituição Preventiva; Vermelho: Substituição Corretiva.

Tabela 5.10 - Resumo dos eventos que ocorreram na simulação, *worksheet* "SimuC". Sem degradação dos componentes.

Nº evento	Tempo na escala do evento (h)	A	B	C	D	E
1	1278					
2	2555					
3	3833					
4	5110					
5	6388					
6	7665					
7	8943					
8	10220					
9	11498					
10	12775					
11	14053					
12	15330					

Verde: Inspeção; Laranja: Substituição Preventiva; Vermelho: Substituição Corretiva

Para poder-se fazer uma melhor comparação entre as duas *worksheets* é necessário perceber como é que se comportaram ao nível dos custos, da fiabilidade total do sistema, e da disponibilidade, na Tabela 5.11 apresenta-se estes dados, divididos nas diferentes iterações.

Tabela 5.11 - Fiabilidade, disponibilidade, e custos obtidos das simulações criadas pelas duas *worksheets*. Sem degradação dos componentes.

Tempo evento (h)	SimuC			Tempo evento (h)	Evolução		
	Fiabilidade	Disponibilidade	Custo total (€)		Fiabilidade	Disponibilidade	Custo total (€)
766	100 %	99,77 %	129	1278	100 %	99,86 %	129
1531	100 %	99,88 %	129	2555	100 %	99,86 %	262
2297	100 %	99,84 %	262	3833	99,93 %	99,85 %	408
3063	100 %	99,88 %	262	4535	99,76 %	99,83 %	6498
3828	99,99 %	99,85 %	408	5110	99,40 %	99,85 %	6498
4594	99,93 %	99,75 %	40305	5110	100 %	99,76 %	39820
5359	100 %	99,79 %	40305	5813	100 %	99,77 %	39890
6125	100 %	99,78 %	40450	6388	100 %	99,77 %	39961
6891	100 %	99,80 %	40450	7090	100 %	99,78 %	40024
7656	100 %	99,79 %	40605	7665	100 %	99,79 %	40097
8422	99,98 %	99,79 %	40750	8368	99,98 %	99,79 %	40170
9188	99,89 %	99,80 %	40750	8925	99,93 %	99,77 %	46335
9953	100 %	99,76 %	80621	10203	99,41 %	99,75 %	46685
10719	100 %	99,78 %	80621	11480	96,82 %	99,76 %	46831
11484	100 %	99,78 %	80757	12758	86,20 %	99,76 %	53007
12250	100 %	99,77 %	80904	13220	75,56 %	99,77 %	53007
13016	99,99 %	99,79 %	80904	13220	100 %	99,74 %	108198
13781	99,96 %	99,78 %	81047	14035	100 %	99,75 %	108266
14547	99,83 %	99,80 %	81047	14498	100 %	99,75 %	108338
15313	99,06 %	99,77 %	121076	15313	100 %	99,74 %	108548

Comparando os dois casos podemos observar que em nenhum dos casos não ocorrem substituições corretivas, como tal a simulação da *worksheet* “*SimuC*” manteve um planeamento organizado e teve melhores desempenhos em termos de disponibilidade. Na simulação da *worksheet* “*Evolução*” os efeitos dos dados do controlo de condição causaram constantes alterações no planeamento, pois à medida que a vibração registada diferia da prevista o algoritmo tentava não só compensar aumentando ou diminuindo o intervalo de inspeção, como também tentava manter as multiplicidades dos intervalos: Mesmo com aparente desorganização do planeamento, os custos registados foram menores.

Tabela 5.12 - Resumo dos eventos que ocorreram na simulação, *worksheet* “*Evolução*”. Com degradação dos componentes.

Nº evento	Tempo na escala do evento (h)	A	B	C	D	E
1	1278					
2	2555					
3	3833					
4	4370					
5	5110					
6	5110					
7	5648					
8	6388					

9	6925					
10	7665					
11	8203					
12	8685					
13	8943					
14	9963					
15	10220					
16	10220					
17	11240					
18	11498					
19	11498					
20	12775					

Verde: Inspeção; Laranja: Substituição Preventiva; Vermelho: Substituição Corretiva.

Dado que os dados do controlo de condição são importantes para verificar qual é que será a degradação dos componentes, será realizada uma segunda aproximação, onde é considerada esta degradação através do fator de degradação de 2% após cada inspeção que é realizada. Nas Tabelas 5.12 a 5.14 apresenta-se os resultados, de uma forma semelhantes aos apresentados para o caso anterior.

Tabela 5.12 - Resumo dos eventos que ocorreram na simulação, worksheet "SimuC". Com degradação dos componentes

Nº evento	Tempo na escala do evento (h)	A	B	C	D	E
1	1278					
2	2555					
3	3833					
4	4938					
5	6216					
6	7493					
7	8771					
8	10048					
9	11326					
10	12603					
11	13881					
12	15158					

Verde: Inspeção; Laranja: Substituição Preventiva; Vermelho: Substituição Corretiva.

Tabela 5.13 - Fiabilidade, disponibilidade, e custos obtidos das simulações criadas pelas duas worksheets. Com degradação dos componentes.

SimuC			Evolução		
Tempo na escala do evento (h)	Disponibilidade	Custo total (€)	Tempo na escala do evento (h)	Disponibilidade	Custo total (€)
639	100 %	0	1278	99,84 %	129
1278	99,86 %	129	2555	99,84 %	262
1916	99,91 %	129	3533	99,84 %	408
2555	99,86 %	262	4370	99,82 %	6498
3194	99,89 %	262	5110	99,84 %	6498
3833	99,85 %	408	5110	99,75 %	39820
4471	99,61 %	48668	5648	99,75 %	39890

5110	99,66 %	48813	6388	99,75 %	39961
5749	99,66 %	48813	6925	99,77 %	40024
6388	99,69 %	48967	7665	99,78 %	40097
7026	99,69 %	48967	8203	99,78 %	40169
7665	99,72 %	48967	8685	99,77 %	46265
8303	99,71 %	49112	8943	99,77 %	46337
8943	99,73 %	49112	9963	99,75 %	46616
9581	99,69 %	88984	10220	99,76 %	46616
10220	99,71 %	88894	10220	99,72 %	68834
10859	99,71 %	89119	11240	99,73 %	68897
11498	99,73 %	89119	11498	99,74 %	68897
12136	99,72 %	89267	11498	99,70 %	108123
12775	99,74 %	89267	12775	99,72 %	108272

Novamente comparando ambos os casos, podemos verificar que na simulação da *worksheet* “*SimuC*” ocorreu uma falha no componente B, algo que não ocorreu na primeira aproximação e que se deveu à degradação do componente. Pode-se observar que neste caso a simulação da *worksheet* “*SimuC*” teve melhor desempenho em termos de custos, mas pior em termos de disponibilidade, adicionalmente, como ocorrem mais eventos ao mesmo tempo (mas em iterações diferentes) na *worksheet* “*Evolução*” o tempo de operação foi menor. Mais à frente, no capítulo da discussão de resultados, será feita uma análise qualitativa aos dados obtidos.

Nas Figuras 5.4 a 5.8 encontra-se compilado em cinco gráficos os valores da vida da vibração expectada e da vibração atual/real para cada componente para a primeira aproximação (sem o fator de degradação), e nas Figuras 5.9 a 5.13 encontra-se o mesmo para a segunda aproximação (com o fator de degradação). Nos gráficos seguintes a curva a laranja corresponde à vida do componente, a amarelo o valor da amplitude de vibração medida, e a cinzento o valor da amplitude de vibração expectada, nas abcissas a escala do tempo está a ser dada através do número de iterações.

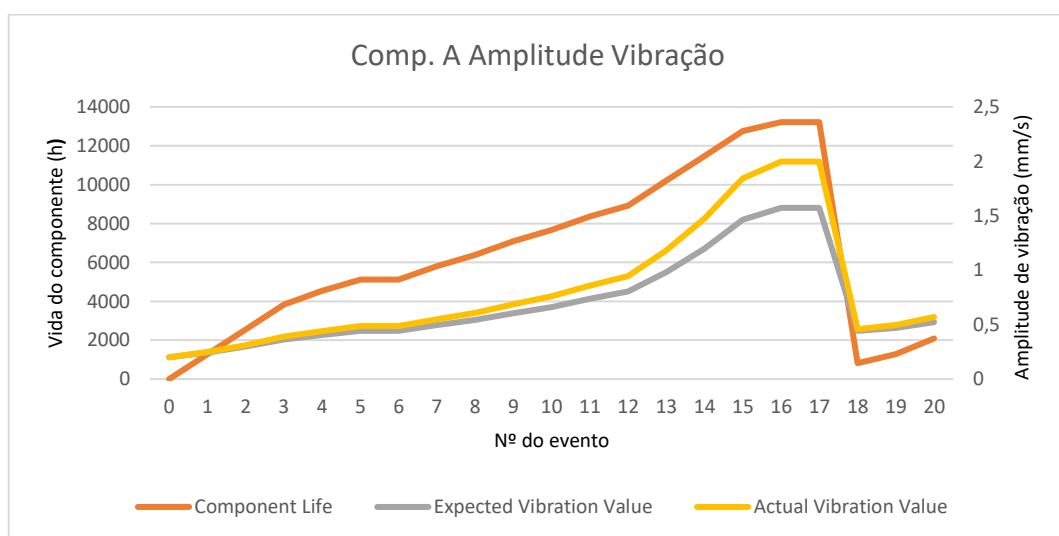


Figura 5.4 - Dados da vida e vibração para o componente A, 1ª aproximação.

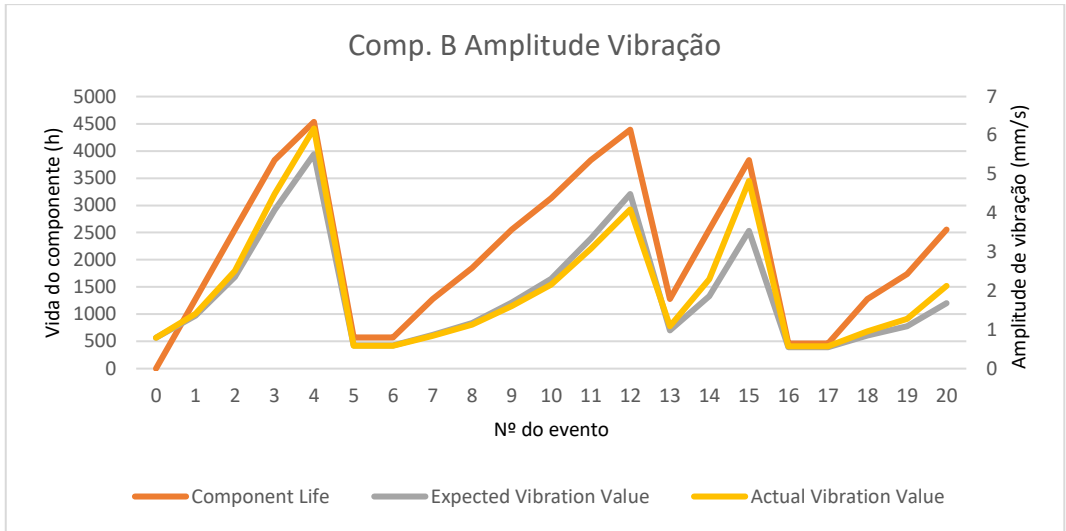


Figura 5.5 - Dados da vida e vibração para o componente B, 1ª aproximação.

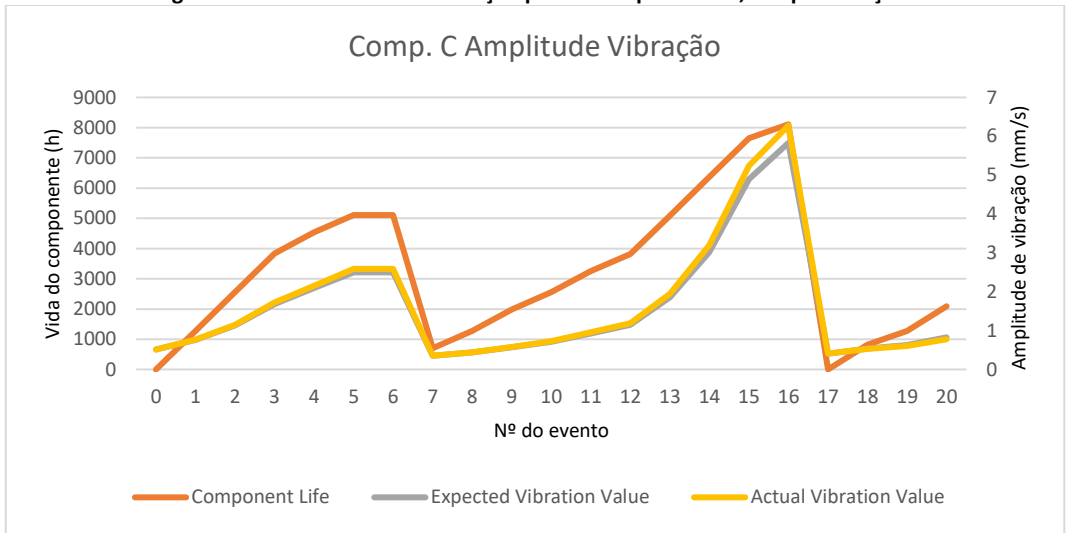


Figura 5.6 - Dados da vida e vibração para o componente C, 1ª aproximação.

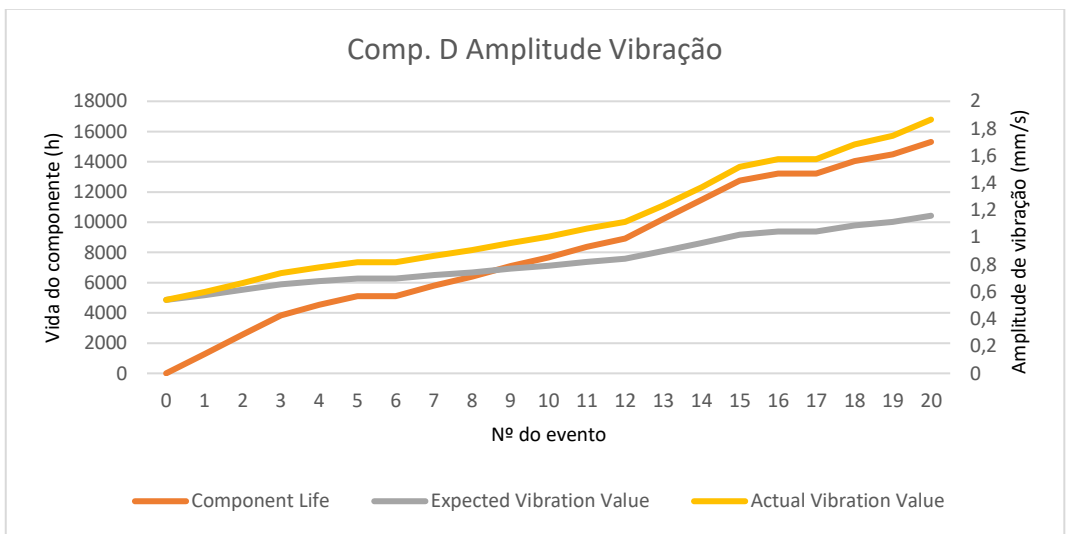


Figura 5.7 - Dados da vida e vibração para o componente D, 1ª aproximação.

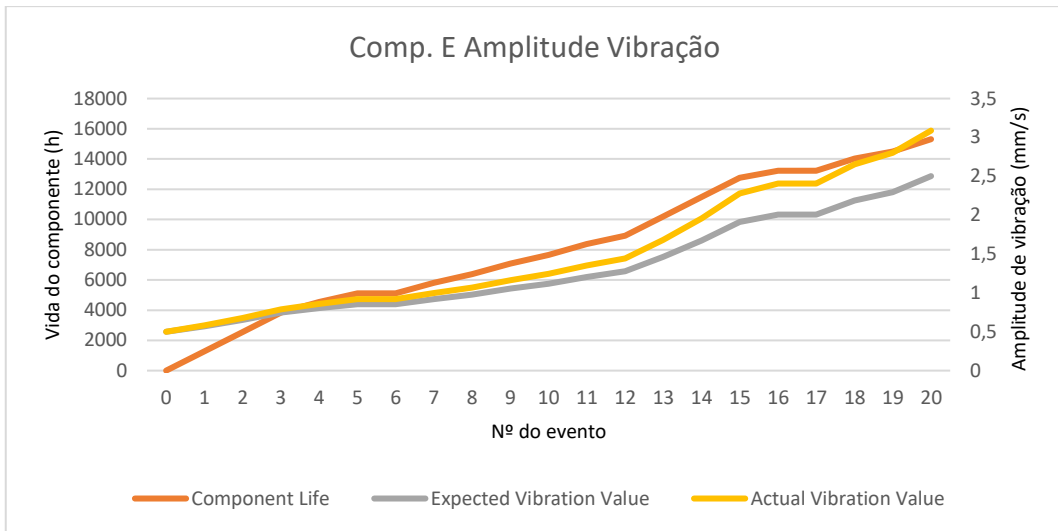


Figura 5.8 - Dados da vida e vibração para o componente E, 1ª aproximação.

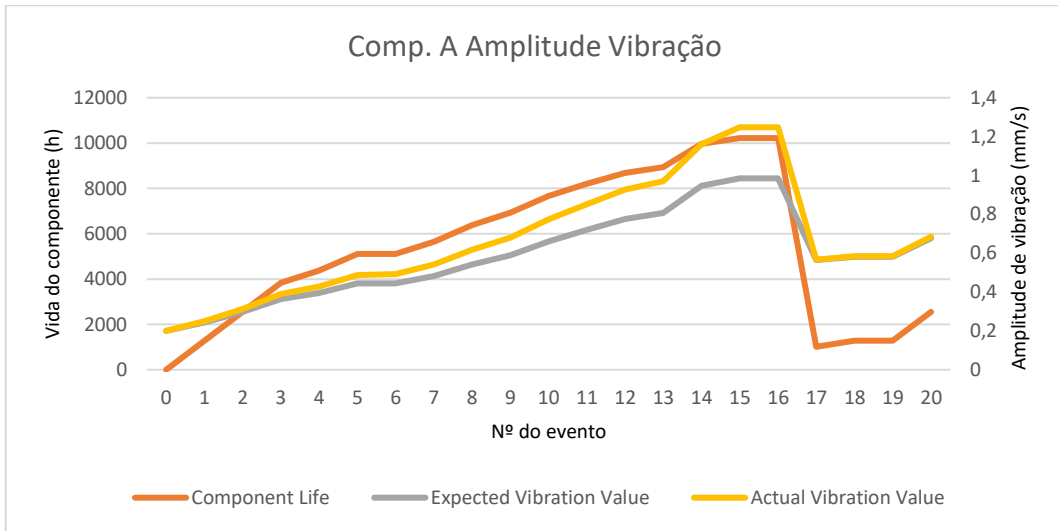


Figura 5.9 - Dados da vida e vibração para o componente A, 2ª aproximação.

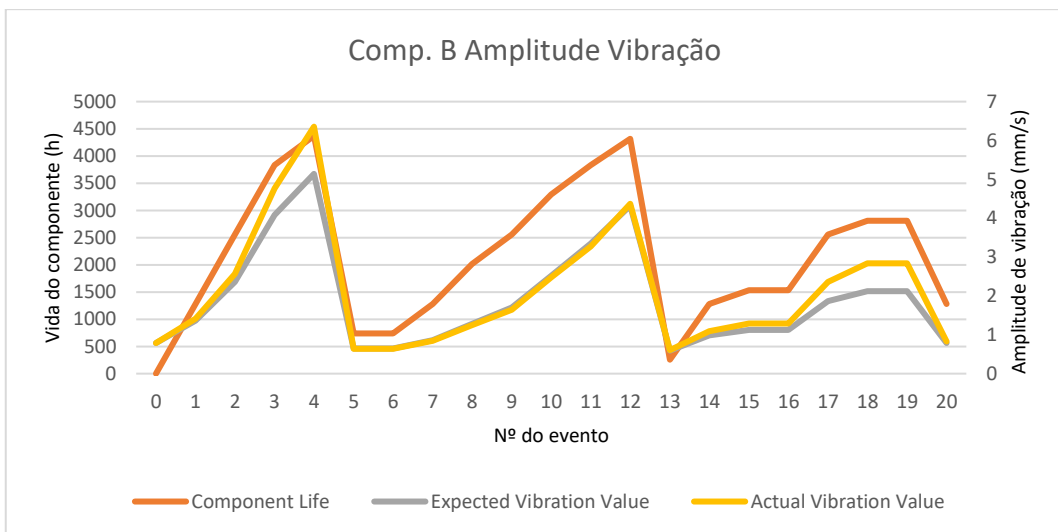


Figura 5.10 - Dados da vida e vibração para o componente B, 2ª aproximação.

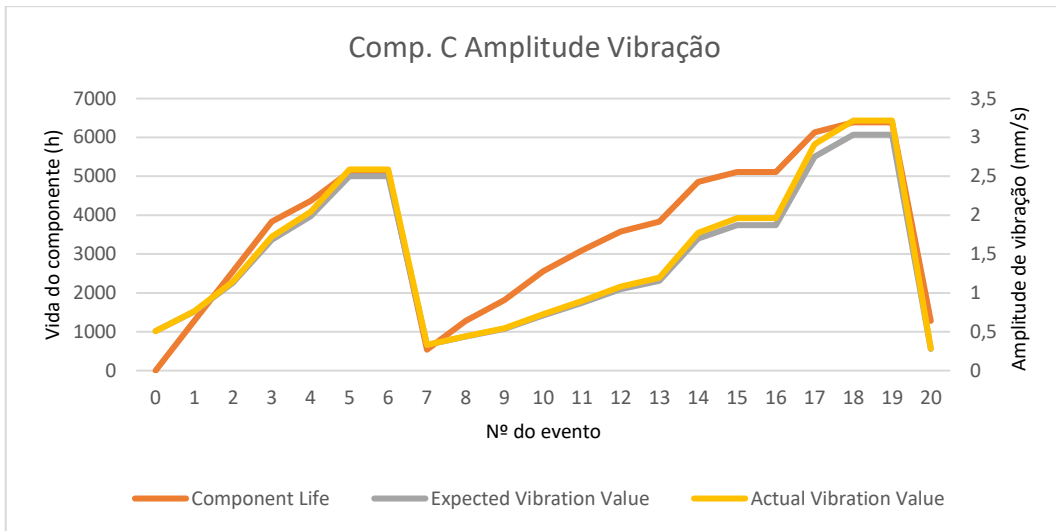


Figura 5.11 - Dados da vida e vibração para o componente C, 2ª aproximação.

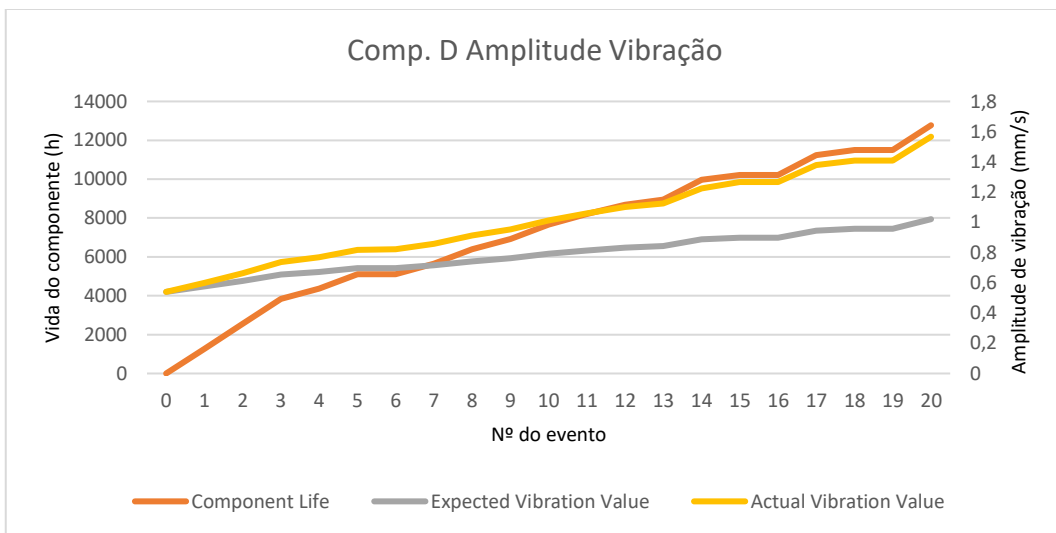


Figura 5.12 - Dados da vida e vibração para o componente D, 2ª aproximação.

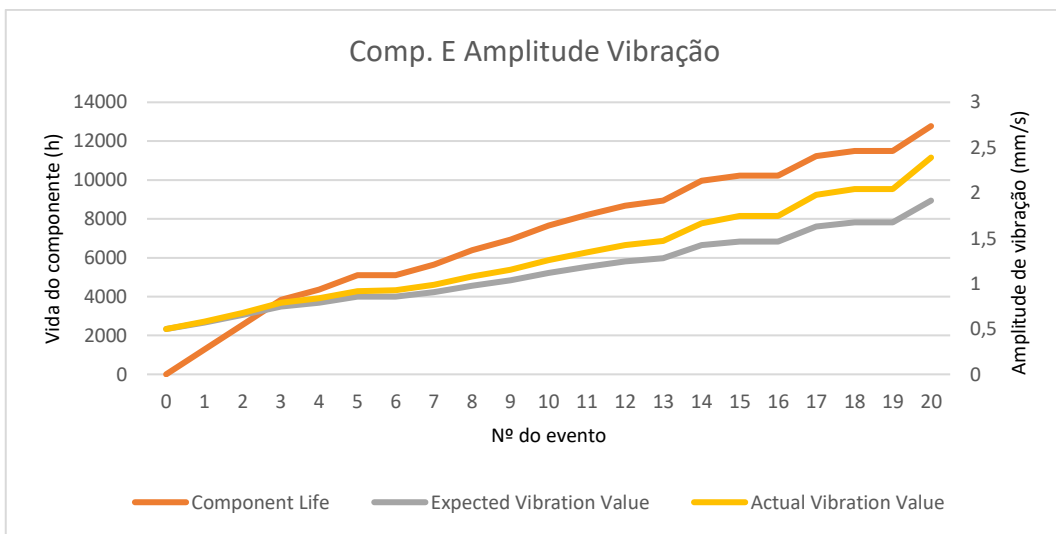


Figura 5.13 - Dados da vida e vibração para o componente E, 2ª aproximação.

Os dados apresentados pelas Figuras 5.4 a 5.13 apenas são para o plano modelado no “Evolução”. Para a maioria dos componentes que foram utilizados a vibração expectável é menor que a vibração atual, adicionalmente, nenhum dos componentes chegou perto do valor limite de 9,5, estabelecido no capítulo anterior. Dado que o nosso valor limite corresponde a um *MTTF* com uma fiabilidade que depende exclusivamente do parâmetro α da distribuição de *Weibull* e nenhum do componente tem um *MTTF* com uma fiabilidade acima dos 60%, não seria de esperar que a amplitude das vibrações chegasse a esse nível sem antes ter falhado ou ter sido substituído preventivamente, adicionalmente como a amplitude da vibração está a ser modelada por uma exponencial não irá chegar a valores perto dos 9,5 exceto quando o componente estiver quase a falhar.

Na Figura 5.14 encontra-se também um gráfico com a evolução global da fiabilidade para a 2ª aproximação, onde a azul é a evolução da fiabilidade do modelo na *worksheet* “Evolução” onde foram introduzidos os dados “reais” e a laranja é a evolução da fiabilidade do modelo na *worksheet* “SimuC”.

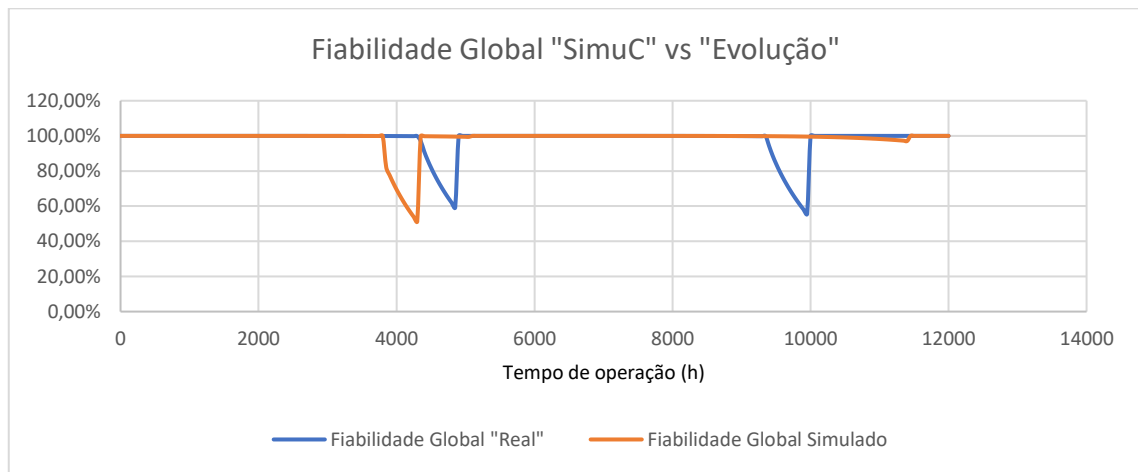


Figura 5.14 - Comparação entre a fiabilidade global do *SimuC* vs a fiabilidade global do *Evolução*. 2ª aproximação.

Aqui podemos observar que a fiabilidade mínima do plano de manutenção modelado no “*SimuC*” aparenta ser menor que a modelada do “*Evolução*”, mas como fiabilidade no geral o “*SimuC*” apresenta melhores resultados.

5.3 Discussão de resultados

Nos dois subcapítulos anteriores foi utilizado um algoritmo dividido em duas partes para a formulação de um plano de manutenção adaptável e ótimo: Para a criação deste plano tiveram-se em consideração um conjunto de fatores importantes. A fiabilidade e a distribuição estatística de *Weibull* foram utilizados para a determinação dos intervalos de manutenção com base na fiabilidade mínima desejada. Foram utilizados os custos e tempos de manutenção para o cálculo do custo ciclo de vida e da disponibilidade do sistema após ter realizado uma operação com um determinado número de horas. Foram considerados alguns aspetos de degradação dos componentes, sendo que para a otimização esta degradação foi simulada através de um fator de degradação aplicado ao parâmetro t_0 , e no caso real medido através da medição do valor das vibrações e aplicado através de um fator de vibração. Utilizou-se o método de *Monte Carlo* para perceber o comportamento expectado de

diversos planos de manutenção quando expostos a entradas aleatórias, sendo elas: os valores de *TTF* para os componentes, que foram gerados recorrendo à distribuição de *Weibull*; e os tempos de realização das ações de manutenção, que foram gerados recorrendo às distribuições normais e exponencial. Através de uma análise qualitativa aos diversos planos de manutenção escolheu-se um plano ótimo. Finalmente para esse plano ótimo foram introduzidos dados relativos a eventos simulados reais e aos respetivos dados de vibração medidos durante as inspeções, sendo que usando estes últimos foi possível produzir o plano de manutenção adaptado às condições reais dos componentes.

Adicionalmente, conseguiu-se introduzir dados relativos ao controlo de condição que permitiram alterar o plano de manutenção original conforme os resultados.

Apesar disto, focando primeiro apenas na primeira parte da otimização, existem alguns fatores que não foram tidos em conta, mas que teria permitido a obtenção de um plano de manutenção mais realista:

1. A disponibilidade dos técnicos e a repartição de cargas. Não é necessário ver se existem técnicos disponíveis para fazer o trabalho na data definida, pois esse tipo de desvios é tratado à parte, mas sim se, para a quantidade de técnicos disponível, a carga imposta pelo plano é a ideal, ou se condensa muito trabalho para uma altura específica. Idealmente teria de existir uma parte específica no algoritmo para entrar em consideração com o número de técnicos disponível, e tentar partir igualmente a carga de trabalho necessária entre eles.
2. A gestão do *stock* disponível. Idealmente, teríamos sempre *stock* disponível para a realização do trabalho, e as únicas diferenças entre uma substituição preventiva e uma corretiva seria no tempo utilizado para diagnosticar o problema, os maiores custos de mão-de-obra, e o tempo de *downtime*. Ou seja, os custos materiais seriam os mesmos, infelizmente isso não acontece sempre, e dependerá da política de gestão de *stock* utilizada. Atualmente o algoritmo considera que existe sempre *stock*, ou que é fácil a aquisição, do componente para a substituição preventiva, mas que para a substituição corretiva nunca existe em *stock* e é necessário a aquisição do componente de forma urgente. Este aspeto poderá depois influenciar o plano de manutenção, pois para uma menor fiabilidade temos mais falhas, e logo custos de reparação que acabam por ser maiores e os tempos de reparação também. Mas para os casos onde a falha é de fácil e rápida resolução caso haja disponibilidade de material e mão-de-obra poderá não se justificar a necessidade de uma fiabilidade tão elevada como a que o programa poderá sugerir.
3. A gestão das ferramentas e dos espaços. Uma área que não foi explorada, e que possivelmente não terá tanto impacto nos resultados, é a necessidade de ferramentas ou de espaços específicos para a realização de determinadas tarefas de manutenção. Neste caso, a questão não se prende tanto saber se existe uma determinada ferramenta de mão disponível para o trabalho, mas sim em que condições terá de ser realizado o trabalho e se é possível as garantir nos períodos necessários. No entanto, tal aspeto pode ser

temporariamente resolvido através do agrupamento das tarefas que necessitem de condições semelhantes num determinado pacote.

4. Interação entre tarefas e o seu agrupamento. Tal como existe a interação entre os componentes, onde quando é necessário trocar um existem outros que também terão de ser trocados, existe também a interação entre tarefas, onde a realização de uma tarefa pode implicar a necessidade de realização de outras. Esta interação pode ser resultante da agregação de tarefas, abordada no ponto 3, onde, devido aos acessos ou às condições necessárias a realização, é vantajoso juntar várias tarefas num pacote e envia-las para serem realizadas ao mesmo tempo, ou de seguida; esta interação também pode ser porque as tarefas têm de ser feitas em conjunto, como por exemplo, uma inspeção em detalhe necessitar de abertura de acessos e da realização de apertos. No algoritmo podemos simular esta interação através de forçar que as tarefas tenham o mesmo intervalo, mas o ideal seria ter uma tabela de interação de tarefas onde estas estivessem separadamente com os seus intervalos e interações, mas depois, para o planeamento, ou estariam na forma de pacotes, ou estariam separadas à mesma, mas com constrangimentos relacionados com esta interação.
5. A influência das tarefas na fiabilidade do sistema. No algoritmo uma substituição repõe totalmente a fiabilidade do componente, salvo alguma degradação inicial introduzida quando é instalado, e as inspeções causam degradações no componente que, por sua vez, afetam os parâmetros de *Weibull* e conseqüentemente a fiabilidade destes. No entanto, diferentes tarefas têm diferentes efeitos na fiabilidade, ou seja, podemos ter tarefas que reponham a fiabilidade do sistema em vez de a sacrificarem. Eventualmente para esta parte poderá ser introduzido o fator de degradação/reposição nas características de uma tarefa e que depois seria utilizado no sistema já existente do algoritmo.
6. Melhorar o processo de otimização. Ou seja, o programa consegue otimizar o plano de manutenção, mas para se conseguir otimizar um plano é necessário arranjar constrangimentos não tão restritos que não deixam o algoritmo encontrar o ponto ótimo, mas não tão laços que o programa demore muito tempo a encontrar este planeamento. E tendo em conta que um sistema poderá ter bastante mais que 5 componentes, e que existem vários fatores a ter em conta, poderá acontecer que seja necessário entrar com constrangimentos que moldem o planeamento para a necessidade do utilizador, mas que, em contrapartida que não atinjam um planeamento verdadeiramente ótimo, mas sim um que seja o melhor para as necessidade impostas, por exemplo ter uma restrição que a fiabilidade mínima tenha de ser 80% para cima, mas para o planeamento ótimo até poderia estar nos 70% de fiabilidade mínima. Adicionalmente, as escolhas dos intervalos podem ser baseadas não num *input* direto do utilizador, mas sim num conjunto de critérios que preenchidos pelo utilizador e que permitam ao programa aprofundar a pesquisa em zonas onde, aparentemente, o plano seria melhor.

Relacionando estes pontos com os resultados da otimização do plano do modelo, pode-se observar que os planos resultantes dos dados resultaram em curvas que, numa primeira

interpretação, não coincidem com o que seria expectável. I. Seria expectável que o custo tivesse uma curva em forma de um sino inverso, onde, a uma fiabilidade pequena haveria custos de manutenção elevados devido à taxa de falhas ser grande, e uma fiabilidade muito elevada, em contrapartida, haveria custos de manutenção também elevados, mas devido à realização de ações de manutenção excessivas; mesmo aprofundando a pesquisa verifica-se a mesma incoerência na segunda e na terceira iteração.

Tal também acontece com a curva de disponibilidade, onde seria expectável que esta tivesse o formato de um sino, ou seja, devido a falhas exageradas ou a manutenção preventiva exagerada ela fosse menor, mas no meio houvesse um ponto ótimo que a maximizasse. Estas incoerências poderão acontecer porque o processo de escolha dos intervalos não seja o mais correto, ou porque alguns dos fatores em falta sejam importantes para se ter planos mais realistas; também poderá ser que os dados de base introduzidos não sejam realistas e que ao testar o programa num caso real as curvas obtidas fossem mais parecidas com o expectável. Em termos da escolha do plano com a fiabilidade mínima a 60%, apesar de ser a escolha mais segura, foi escolhido em vez do plano com fiabilidade a 20% por ter uma melhor relação disponibilidade-custo, no entanto em qualquer um dos casos a disponibilidade é superior a 99%, ou seja, pode estar a acontecer que os intervalos escolhidos sejam demasiado elevados para os tempos de manutenção, resultando em disponibilidades bastante elevadas.

Já na parte da introdução dos dados do controlo de condição existem outros pontos que vale apenas abordar:

1. Nos componentes existem várias causas, não relacionadas com a degradação natural do componente, para se registarem vibrações num sistema diferentes das normais, sendo que é importante perceber se um determinado registo anormal é um caso isolado ou se realmente é necessário atuar no componente, e assim é expectável que existam níveis de vibração diferentes dos normais. Isto significa que o tratamento destes dados poderá ser feito fora do algoritmo, e que apenas seria necessário o registo de alterações significativas que justifiquem a realização do ajuste no intervalo.
2. Após a inserção dos dados do controlo de vibração é necessário o ajuste do planeamento das tarefas de manutenção. Mas nesse ajuste é necessário não esquecer o plano original e os seus constrangimentos, ou seja, não se pode apenas aplicar o fator de vibração e declarar o resultado como o novo plano, terá de ser realizada uma série de ajustes em todos os intervalos das tarefas para que se mantenha o sincronismo das tarefas e ao mesmo tempo a multiplicidade dos intervalos. Numa primeira fase não seria necessário a realização de uma otimização, pois o novo plano seria suficientemente próximo do original que tal não se justificaria. No entanto quando o plano já estivesse bastante afastado do original seria feita uma nova otimização através da inserção dos dados no “*SimuC*”.

Olhando para os resultados podemos verificar que existe uma deficiência no algoritmo na parte da sincronização pois os planos de manutenção ficam imediatamente desorganizados assim que o algoritmo mexe nesses após receber os dados do controlo de condição. Ao nível da fiabilidade, a comparação entre a fiabilidade global do *SimuC* e a da *Evolução* torna-se mais complicada pois a

degradação do componente detetada pelo controlo de condição causa uma alteração da fiabilidade pois esta depende dos parâmetros de *Weibull* e estes são ajustados pelo fator de vibração, o que justifica o segundo pico da Figura 5.14, pois foi detetada alguma vibração acima do normal e logo antecipar as substituições preventivas dos componentes A, B e C.

6 Conclusões e estudos futuros

Neste capítulo apresentam-se as conclusões no trabalho e recomendações para estudos futuros.

6.1 Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo que otimiza planos de manutenção consoante um conjunto de dados fixos relativos ao equipamento em questão, critérios de otimização baseados na fiabilidade, e introdução de dados variáveis na falha e nos tempos de manutenção. Sendo que a forma que o algoritmo faz de otimização é através do método de *Monte Carlo*. Após a criação do plano de manutenção otimizado, o algoritmo está preparado para receber dados relativo à condição dos componentes do equipamento, vindos das inspeções realizadas no âmbito do controlo de condição. Após ter sido aplicado o algoritmo num sistema modelo formado por cinco componentes em série, baseado em dados de falha reais, foi possível criar um plano de manutenção otimizado que ia ao encontro aos critérios de fiabilidade inicialmente impostos. No entanto, quando se chegou à introdução dos dados relativos à condição o algoritmo foi capaz de ajustar os intervalos e manter uma periodicidade múltipla entre as várias tarefas de manutenção, mas não foi possível manter o sincronismo entre elas. Este programa foi inicialmente criado em *Excel*, e apesar de ser uma plataforma excelente para este tipo de programação, espera-se que seja possível replicar a metodologia noutras plataformas de programação.

O objetivo desta dissertação era a de criar um programa que pudesse ser utilizado em várias indústrias e com a vantagem de conseguir combinar dois conceitos muito importantes para o desempenho operacional e lucrativo de uma fábrica, sendo que teria a vantagem de permitir uma rápida tradução dos dados da condição em alterações do plano de manutenção, e também permitir ao utilizador do algoritmo ajustar as datas para a realização das tarefas de manutenção e mesmo assim conseguir otimizar o plano sempre que acha-se necessário.

Apesar dos problemas encontrados, estes não são impeditivos para um continuo desenvolvimento do algoritmo, pois o mais importante é a metodologia e ele introduz, outros fatores que poderiam ser considerados, como a gestão de um determinado *stock* específico, ou a gestão do pessoal técnico, ou até mesmo a estruturação de equipamentos, já são estão muito bem conseguidos em programas género do SAP, sendo assim o algoritmo proposto teria uma função complementar ao que já existe e permitiria introduzir uma funcionalidade que melhoraria significativamente o potencial já elevado desses programas.

6.2 Estudos futuros

Testou-se o programa num caso modelo que, apesar de baseado em casos reais, não conseguiu replicar o comportamento espectável destes. Como primeira recomendação para estudos futuros seria a de testar o algoritmo com dados o mais realista possíveis. Como segunda recomendação para estudos futuros é a de introduzir um método de otimização mais abrangente, uma ideia permitir uma melhor otimização seria de em vez de utilizar o intervalo mínimo base como

pivot para a aplicação dos múltiplos, quando inserida a fiabilidade mínima cada um dos componentes teria a chance de servir como *pivot* através do intervalo resultante. Tal alteração aumentaria significativamente o tempo até o algoritmo conseguir obter um plano de manutenção, mas em contrapartida seriam gerados mais pontos e logo melhores hipóteses de ter o plano ótimo. A próxima recomendação para um estudo futuro seria o de terminar a parte da introdução dos dados do controlo de condição; aqui não está a ser referido a falta de sincronismo, visto que neste ponto o algoritmo não se preocupa tanto com a otimização por isso seria apenas uma questão de ajustar o intervalo de tempo até à próxima ação de manutenção; aqui é necessário entrar mais em detalhe nos conceitos de controlo de condição, mais especificamente a introdução de critério que permitam o algoritmo decidir quando é que deve realizar o ajuste no intervalo, à medida que vamos recolhendo os dados das falhas como é que podemos ajustar as curvas expectadas da degradação dos componentes. Finalmente, seria interessante aumentar os graus de liberdade, como por exemplo qual é a probabilidade de termos os técnicos disponíveis para resolver uma falha quando esta acontecer, para que consigamos ter modelos de situações reais mais realistas.

7 Bibliografia

- Barringer, H. P. (1 de June de 1998). Life-Cycle Cost Simulation. *MonteCarloSimulations*. Humble, Texas, USA: Barringer & Associates, Inc.
- Andrews, J. D., & Moss, T. R. (1993). *Reliability and Risk Assessment*. Longman Scientific & Technical.
- Assis, R. (2014). *Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos*. Lisboa: LIDEL.
- Assis, R. (s.d.). *EXCEL na Simulação de Sistemas e Análise de Risco*. Rui Assis.
- Broch, J. T. (1980). *Mechanical Vibration and Shock Measurements*. Bruel & Kjaer.
- Carvalho, G., Medeiros, N., Madeira, H., & Cabral, B. (2022). A Functional FMECA approach for the assessment of critical infrastructure resilience. *IEEE 22nd International Conference on Software Quality*, (pp. 672-681).
- Chai, W., Labbe, M., & Stedman, C. (s.d.). *Big data analytics*. Obtido de TechTarget Web site: <https://www.techtarget.com/searchbusinessanalytics/definition/big-data-analytics>
- Chen, Y., Liu, Y., Liu, B., & Kang, R. (2012). Status of FMECA research and engineering application. *Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing)*, 1-9.
- Choudhary, K., & Sidharthan, P. (2016). Failure mode effects and criticality analysis (FMECA) of Electronic Power Conditioner (EPC). *2016 5th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)* (pp. 343-346). Semantic Scholar.
- Christer, A. H., & Whitelaw, J. (1983). An Operational Research Approach to Breakdown Maintenance: Problem Recognition. *Journal of the Operational Research Society*, 1041-1052. Obtido de <https://www.jstor.org/stable/2581013>
- Christiansen, B. (29 de Setembro de 2017). *Ultimate Guide To Reliability Centered Maintenance*. Obtido de Limble Web site: <https://limblecmms.com/blog/a-maintenance-managers-guide-to-reliability-centered-maintenance/>
- Coleman, D. C. (1956). Industrial Growth and Industrial Revolutions. *Economica*, 1-22.
- Crawford, A. (1992). *Simplified Handbook of Vibration Analysis, Vol. 1 and Vol. 2*. Computational Systems, Inc.
- Darragh, P. (08 de Setembro de 2020). *The Origins of Predictive Maintenance*. Obtido de Mariner Web site: <https://www.mariner-usa.com/blog/the-origins-of-predictive-maintenance>
- Ford, H. (1919). *FORD MANUAL*.
- FTMaintenance. (11 de Novembro de 2019). *How Maintenance Practices Have Changed*. Obtido de FTMaintenance Web site: <https://ftmaintenance.com/maintenance-management/how-maintenance-practices-have-changed/>
- ISO 10816. (2009). *ISO 10816: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*. Geneva: International Standard Organization.

- ISO 14224. (2016). *ISO 14224 - Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. Geneva: International Standard Organization.
- John, & Bruton, L. (s.d.). *Scientific Management Theory*. Obtido de Lumen Learning Web site: <https://courses.lumenlearning.com/wm-introductiontobusiness/chapter/scientific-management-theory/>
- Limble CMMS. (27 de Outubro de 2021). *Vibration Analysis: An Explainer on Processes, Equipment, and Benefits*. Obtido de LimbleCMMS website: <https://limblecmms.com/blog/vibration-analysis/>
- Metropolis, N., & Ulam, S. (1949). The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 335-341.
- Mobley, R. K. (2004). *Maintenance Fundamentals*. Burlington: Elsevier.
- Modarres, M. (1993). *What every Engineer should know about Reliability and Risk Analysis*. Ohio: Marcel Dekker, inc.
- Muntone, S. (4 de Fevereiro de 2012). *Second Industrial Revolution*. Obtido de Education Web site: <https://web.archive.org/web/20131022224325/http://www.education.com/study-help/article/us-history-glided-age-technological-revolution/>
- Orosz, T., Sörös, P., Raisz, D., & Tamus, Á. Z. (23 de Setembro de 2015). *Analysis of the Green Power Transition on Optimal Power Transformer Designs*. Obtido de Periodica Polytechnica Website: <https://pp.bme.hu/eecs/article/view/8583>
- Poor, P., Ženíšek, D., & Basl, J. (Agosto de 2019). *Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions*. Obtido de ResearchGate Web site: <https://www.researchgate.net/publication/335444202>
- Sensor-Works. (26 de Junho de 2018). *Predictive Maintenance Software: A Short History*. Obtido de Sensor-Works Web site: <https://www.sensor-works.com/history-predictive-maintenance-software/>
- Silva, C. W. (2005). *Vibration and Shock Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC.
- Spear, B. (Março de 2008). *James Watt: The steam engine and the commercialization of patents*. Obtido de ScienceDirect Web site: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0172219007000932>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (s.d.). *Distribution function*. Obtido de Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/distribution-function>
- Wowk, V. (1991). *Machinery Vibration – measurement and analysis* .

ANEXO I

Neste anexo apresenta-se uma metodologia para a obtenção das curvas de falha conforme a distribuição de *Weibull* para um determinado componente a partir dos seus dados de falha. Nas Figuras 7.1 e 7.2 apresenta-se um registo das várias falhas que ocorreram num determinado componente.

Tempo de falha do componente em horas de operação													
1	22174	39	23198	77	20863	115	20253	153	28365	191	20726	229	20842
2	22242	40	22249	78	28125	116	21309	154	17057	192	20790	230	20217
3	22243	41	20318	79	22839	117	27015	155	19807	193	20491	231	22917
4	21032	42	20770	80	19042	118	23130	156	18738	194	21876	232	27917
5	22834	43	23151	81	23631	119	20456	157	21213	195	23465	233	22373
6	27603	44	21518	82	22402	120	24167	158	22719	196	23866	234	24081
7	20811	45	21575	83	28701	121	25170	159	23139	197	21030	235	23856
8	23350	46	21616	84	20663	122	20883	160	23620	198	22063	236	19676
9	23479	47	26630	85	20566	123	24823	161	21995	199	21076	237	21436
10	21438	48	25912	86	24792	124	23599	162	21355	200	19888	238	22010
11	25325	49	26837	87	21138	125	23095	163	21282	201	24966	239	22376
12	22797	50	20500	88	20311	126	21582	164	23832	202	20671	240	25119
13	22415	51	19809	89	25363	127	24063	165	32720	203	22988	241	23776
14	22983	52	26077	90	23399	128	24238	166	19969	204	20612	242	24262
15	22070	53	21500	91	23303	129	22195	167	23490	205	20380	243	21332
16	24535	54	27036	92	25314	130	24646	168	21081	206	28891	244	25404
17	23860	55	21941	93	23447	131	23630	169	21796	207	23680	245	24622
18	18699	56	21033	94	24185	132	22593	170	21772	208	20577	246	23828
19	22765	57	24839	95	22395	133	24456	171	26019	209	22154	247	27192
20	24917	58	25908	96	20621	134	23193	172	21948	210	21316	248	26860
21	25211	59	24808	97	20586	135	24564	173	21635	211	23715	249	23236
22	24161	60	21756	98	17405	136	25899	174	20186	212	30416	250	25961
23	22015	61	24839	99	19851	137	21552	175	21176	213	20492	251	25447
24	21020	62	20759	100	22053	138	26649	176	22804	214	24571	252	23208
25	19138	63	23964	101	19907	139	21164	177	22137	215	24971	253	23741
26	19851	64	22389	102	22513	140	23092	178	24680	216	26285	254	22903
27	18680	65	23364	103	23406	141	24943	179	20255	217	22509	255	22245
28	26551	66	23188	104	20824	142	25204	180	21811	218	18870	256	23619
29	26484	67	22553	105	22235	143	23864	181	26256	219	20441	257	23046
30	19643	68	26393	106	21975	144	21460	182	24630	220	21221	258	26894
31	19181	69	20693	107	23607	145	20905	183	20451	221	25360	259	23035
32	24999	70	20489	108	21178	146	24933	184	23435	222	28776	260	23008
33	24484	71	23468	109	21989	147	21144	185	20510	223	22147	261	24061
34	20742	72	20141	110	20730	148	22205	186	24389	224	22628	262	23692
35	23064	73	22324	111	18465	149	22650	187	18978	225	25184	263	24204
36	22140	74	22495	112	21222	150	23237	188	20718	226	21862	264	19594
37	21031	75	24187	113	26285	151	22488	189	24079	227	20075	265	22711
38	24171	76	21725	114	23809	152	20451	190	20816	228	22586	266	19747

Figura 7.1 - Conjunto de falhas que ocorrem num componente de uma máquina. A colunas ímpares representam o número do registo, as pares o registo do tempo de falha em horas. (1/2)

Tempo de falha do componente em horas de operação													
267	20388	305	24930	343	22656	381	24318	419	22246	457	24848	495	26302
268	18948	306	28682	344	21139	382	20012	420	20925	458	23825	496	21713
269	18957	307	25986	345	23163	383	22863	421	27372	459	22573	497	21718
270	20972	308	23298	346	27341	384	22850	422	25234	460	20494	498	24068
271	29956	309	23544	347	20924	385	20187	423	26491	461	23975	499	25372
272	25734	310	24247	348	23070	386	20696	424	27385	462	23522	500	20712
273	20309	311	22820	349	23945	387	23871	425	19290	463	21849		
274	19969	312	23898	350	23997	388	24935	426	23655	464	23149		
275	23568	313	23653	351	23056	389	22051	427	20094	465	22401		
276	23238	314	23356	352	26875	390	20470	428	26585	466	25842		
277	22936	315	25384	353	27590	391	22631	429	22885	467	23495		
278	22608	316	26766	354	20926	392	22012	430	21483	468	22871		
279	26042	317	20896	355	20789	393	23664	431	24681	469	22261		
280	25479	318	25646	356	23413	394	19898	432	19568	470	20018		
281	23775	319	24154	357	21353	395	28623	433	22192	471	23595		
282	24842	320	25649	358	22650	396	28027	434	22034	472	21205		
283	22934	321	23814	359	21467	397	20028	435	24840	473	21681		
284	23390	322	22526	360	21098	398	21428	436	22829	474	20108		
285	22305	323	22914	361	22445	399	25669	437	23506	475	23748		
286	24718	324	25022	362	23957	400	27719	438	24731	476	25695		
287	18819	325	22754	363	24204	401	24800	439	22453	477	21307		
288	19232	326	26120	364	30355	402	27252	440	23520	478	26680		
289	22296	327	23398	365	21659	403	20671	441	28001	479	26206		
290	27147	328	18408	366	20968	404	25820	442	22280	480	22618		
291	24120	329	25807	367	22562	405	19367	443	22253	481	25919		
292	24879	330	18698	368	19423	406	25201	444	23132	482	22383		
293	21151	331	20645	369	23612	407	29217	445	21665	483	21834		
294	22388	332	20500	370	21379	408	21875	446	21857	484	23243		
295	21461	333	27080	371	20499	409	19454	447	26871	485	22189		
296	20475	334	19271	372	19648	410	22824	448	23930	486	23931		
297	27174	335	22386	373	22226	411	23041	449	20115	487	29574		
298	25322	336	24724	374	24615	412	23515	450	18577	488	23426		
299	20598	337	24078	375	21471	413	25527	451	21908	489	20929		
300	28088	338	21956	376	20623	414	23339	452	21264	490	20331		
301	20857	339	22220	377	19816	415	24358	453	21439	491	25639		
302	19369	340	22143	378	29653	416	24507	454	21096	492	21920		
303	23275	341	22280	379	19517	417	18931	455	24886	493	24437		
304	20763	342	24189	380	24123	418	24014	456	27917	494	20153		

Figura 7.2 - Conjunto de falhas que ocorrem num componente de uma máquina. A colunas ímpares representam o número do registo, as pares o registo do tempo de falha em horas. (2/2)

Pegando em todos os valores do registo podemos ordenar do maior ao mais pequeno e depois agrupar estes registos dentro de intervalos de tempo previamente definidos e observáveis na Figura 7.3, e permitindo assim obter o gráfico apresentado.

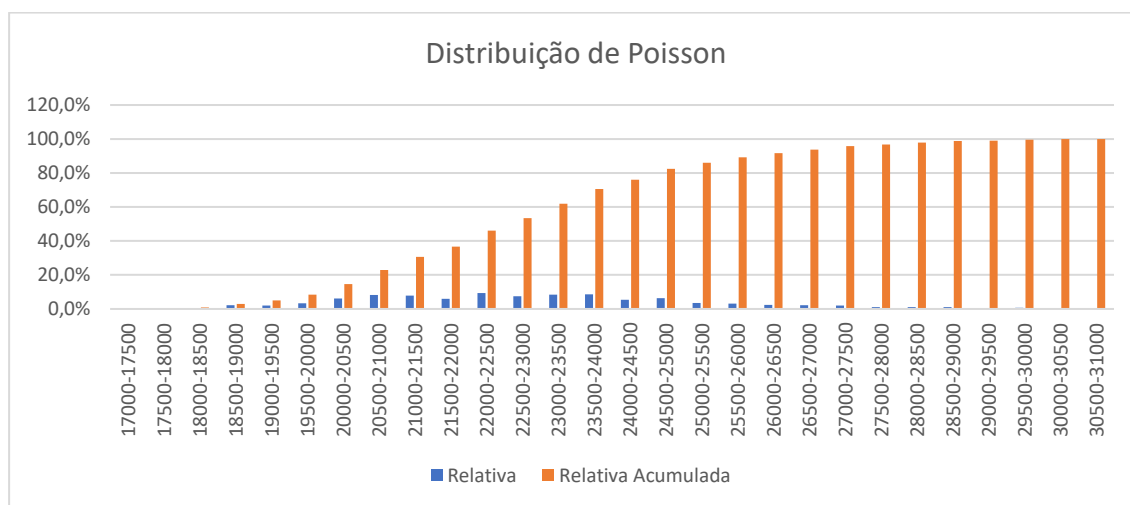


Figura 7.3 - Gráfico com as falhas do componente agrupadas em diversos intervalos de tempo (em horas).

O método para a construção do gráfico apresentado é tipicamente utilizado para construir distribuições de *Poisson* no entanto permite visualizar como é que um conjunto de dados de falha podem ser modelados numa função de distribuição estatística. No exemplo apresentado pelo gráfico as colunas a azul resultaria na função densidade de falha, e as colunas a laranja seria a probabilidade acumulada de falha. Tendo os dados da falha podemos estimar os parâmetros de *Weibull*. começando a fórmula da probabilidade acumulada de falha já apresentada anteriormente:

$$F(t - t_0, \beta, \alpha) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \quad (27)$$

E sendo F a probabilidade de o componente ter falhado, então $1-F$ é a fiabilidade, ou seja, a probabilidade de ele não ter falhado. Assim sendo a expressão fica:

$$\begin{aligned} 1 - R(t) &= 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \\ R(t) &= e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \\ \frac{1}{R(t)} &= e^{\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \\ \ln\left(\frac{1}{R(t)}\right) &= \left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha \\ \ln\left(\ln\left(\frac{1}{R(t)}\right)\right) &= \ln\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha \\ \ln\left(\ln\left(\frac{1}{R(t)}\right)\right) &= \alpha \cdot [\ln(t - t_0) - \ln(\beta)] \\ \ln\left(\ln\left(\frac{1}{R(t)}\right)\right) &= -\alpha \cdot \ln(\beta) + \alpha \cdot \ln(t - t_0) \end{aligned} \quad (28)$$

Olhando para a expressão (28), mais especificamente o lado esquerdo, pode-se observar que $-\alpha \cdot \ln(\beta)$ é um valor fixo e $\alpha \cdot \ln(t - t_0)$ é um valor variável, logo temos aqui uma equação de reta $y = b \cdot x + a$: assim podemos estimar α através do declive da reta e β através da ordenada na origem. Tendo um registo com os valores do tempo de falha temos automaticamente a nossa varável t , para descobrir o $R(t)$, e assim o $\ln\left(\ln\left(\frac{1}{R(t)}\right)\right)$, pode-se utilizar os valores das medianas. Um dos métodos mais conhecidos é o de *Bernard*, expresso da fórmula (29).

$$F(t_j) = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \quad (29)$$

Onde j é o número de ordem (por exemplo, a terceira falha considerada tem um número de ordem 3), e n é o número total de falhas (Assis, Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos, 2014). Voltando ao exemplo aplicando este método os nossos registos conseguimos estimar o $F(t_j)$ para todas as falhas.

Nas Figuras 7.4 a 7.8 apresenta-se os resultados.

Ordem <i>j</i>	TTF	TTF-t ₀	Mediana - F(t)	Ordem <i>j</i>	TTF	TTF-t ₀	Mediana - F(t)
457	26490,50	10095,03	0,9127	495	29574,02	13178,55	0,9886
458	26550,86	10155,39	0,9147	496	29653,29	13257,82	0,9906
459	26584,70	10189,23	0,9167	497	29956,08	13560,61	0,9926
460	26630,37	10234,90	0,9187	498	30354,51	13959,04	0,9946
461	26648,95	10253,48	0,9207	499	30416,25	14020,78	0,9966
462	26680,27	10284,80	0,9227	500	32720,18	16324,71	0,9986
463	26766,06	10370,59	0,9247				
464	26836,85	10441,38	0,9267				
465	26859,71	10464,24	0,9287				
466	26871,10	10475,63	0,9307				
467	26875,18	10479,71	0,9327				
468	26893,72	10498,25	0,9347				
469	27015,17	10619,70	0,9367				
470	27036,06	10640,59	0,9386				
471	27079,98	10684,51	0,9406				
472	27147,17	10751,70	0,9426				
473	27173,51	10778,04	0,9446				
474	27192,41	10796,94	0,9466				
475	27251,56	10856,09	0,9486				
476	27341,09	10945,62	0,9506				
477	27372,01	10976,54	0,9526				
478	27384,65	10989,18	0,9546				
479	27589,83	11194,36	0,9566				
480	27602,57	11207,10	0,9586				
481	27718,85	11323,38	0,9606				
482	27916,56	11521,09	0,9626				
483	27917,30	11521,83	0,9646				
484	28001,28	11605,81	0,9666				
485	28026,99	11631,52	0,9686				
486	28087,96	11692,49	0,9706				
487	28124,65	11729,18	0,9726				
488	28364,71	11969,24	0,9746				
489	28622,95	12227,48	0,9766				
490	28682,06	12286,59	0,9786				
491	28700,70	12305,23	0,9806				
492	28776,44	12380,97	0,9826				
493	28891,27	12495,80	0,9846				
494	29217,05	12821,58	0,9866				

Figura 7.8 - Aplicação do método de Bernard nos 500 registos. (Tempos apresentados em horas) (5/5)

Tendo os valores de t e $F(t)$ podemos então adapta-los tendo em conta a expressão (28) apresentada anteriormente, ou seja, ficamos os valores $\ln(t)$, inicialmente assume-se que t_0 é igual a 0 sendo que o seu valor será posteriormente determinado, e $\ln(\ln(1/(1-F(t))))$. Agora precisamos de obter a ordenada na origem e o declive da nossa curva, algo que podendo obter através das funções *INTERCEPT* e *SLOPE* respetivamente, com a segunda obtemos diretamente o α , com a primeira ainda é preciso fazer mais uma contas:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{R(t)}\right)\right) = -\alpha \cdot \ln(\beta) + \alpha \cdot \ln(t - t_0) \quad (30)$$

Se a ordenada está na origem então:

$$Y = -\alpha \cdot \ln(\beta) \quad (31)$$

$$e^{\frac{Y}{-\alpha}} = \beta \quad (32)$$

Onde Y é o resultado da função *INTERCEPT*. Falta ainda um passo final, lembrando que foi assumido que t_0 tinha o valor 0, mas, como sabemos, isto nem sempre é verdade, para conseguirmos garantir que a nossa função de *Weibull* está o melhor estimada possível podemos calcular o coeficiente de correlação r^2 que é um coeficiente de determinação e é obtido através do quadrado da função de *Excel CORREL*. Com o coeficiente de determinação calculado o nosso objetivo é do maximizar (sendo que o valor máximo dele é 1) e isto é conseguido mudando o valor de t_0 até se descobrir um ponto onde r^2 é máximo (utilizando o *Excel* é possível determinar t_0 analiticamente). Para o nosso exemplo então, com t_0 igual a zero temos que o valor de *INTERCEPT* é igual a -118,66 e o valor de α é igual a 11,77, logo o β vai dar 23991,72. Fazendo a correlação r^2 obteve-se 0,91, e

alterando o valor de t_0 , atingimos um máximo com $r^2=0,98$ chegando aos seguintes parâmetros de *Weibull*:

- $\alpha = 3,18$;
- $\beta = 7331,02$;
- $t_0 = 16395,47$ horas;

Resultando nas curvas representadas na Figura 7.9.

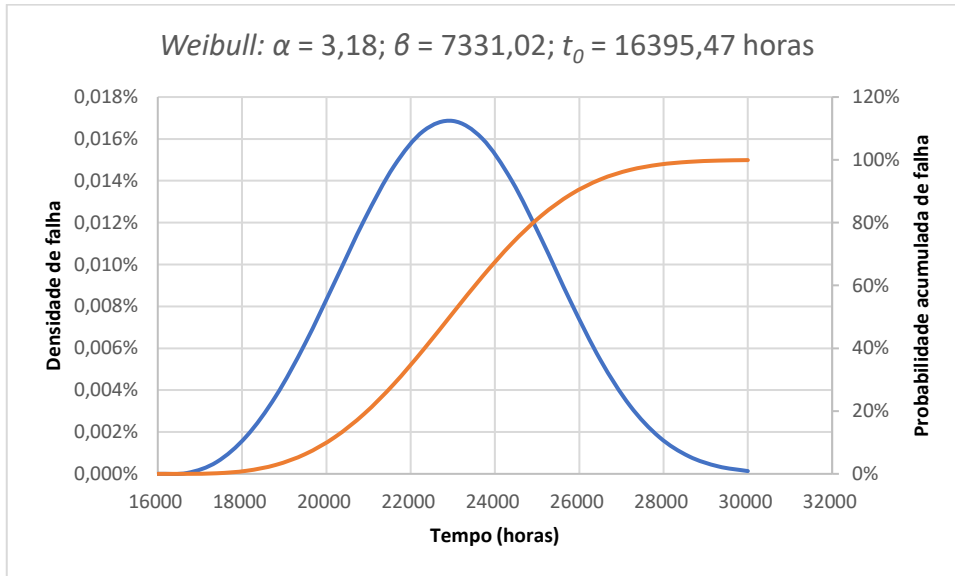


Figura 7.9 - Curva da densidade de falha e da probabilidade acumulada de falha para distribuição de *Weibull* (parâmetros no título do gráfico). A azul está representada a curva de densidade de falha e a laranja a probabilidade acumulada de falha.

Usando esta metodologia consegue-se obter a curva da falha para todo o tipo de componentes. Esta é a distribuição que será utilizada no nosso algoritmo para calcular a fiabilidade dos componentes e para gerar as falhas dos componentes a partir de números aleatórios.

ANEXO II

Neste anexo encontra-se apresentado um exemplo, feito em *Excel*, da aplicação do método de *Monte Carlo*.

Suponhamos que temos um enorme quadrado amarelo que com as dimensões de 25 x 25, dentro desse quadrado temos 3 áreas assinaladas cores diferentes e com tamanhos diferentes, conforme a Figura 7.10.

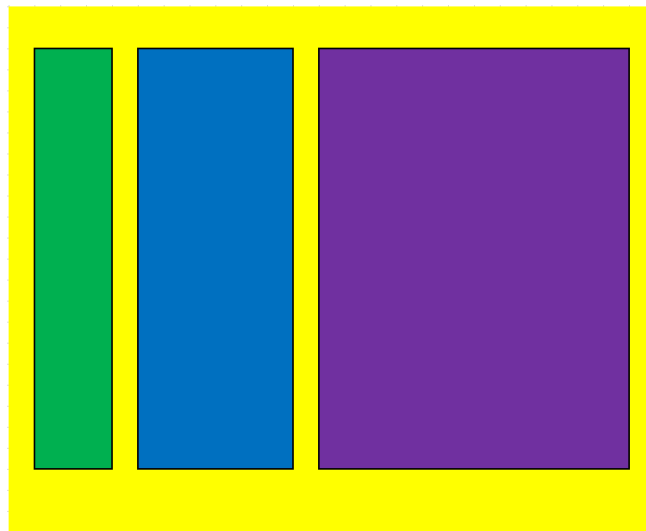


Figura 7.10 - Quadrado amarelo que contém três áreas de cores diferentes.

O nosso objetivo é saber qual a % de espaço que ocupa cada zona dentro do quadrado amarelo, para tal vamos construir um sistema que aleatoriamente gera dois números inteiros entre 1 e 25, sendo que o conjunto deles forma uma coordenada (exemplo: 2 e 4 tenho a coordenada (2,4)) que representa uma localização dentro do quadrado amarelo, com essa coordenada em mente o sistema largou uma esfera e assinala em que zona do quadrado ela acertou, pode ser a amarela, a verde, a azul, e a roxa. Repetindo 500 vezes podemos depois contando o número de esferas que acertou em cada zona. Após o teste chegamos aos seguintes valores:

- Amarelo: 171;
- Verde: 51;
- Azul: 80;
- Roxo: 198;

Se somarmos o total de esferas largadas e dividirmos cada quantidade por esse total percebemos que 10,20% das esferas calharam na zona verde, 16,00% na zona azul, e 39,60% na zona roxa, sendo que o restante calhou na amarela. Sabendo que a área total do quadrado amarelo é 625 (aqui a unidade é irrelevante), multiplicando a área total pelas percentagens resulta na zona verde a ter uma área de 63,8, a vermelha 100,0 e a roxa 247,5. As áreas verdadeiras são 60, 120 e 240 respetivamente, no entanto, através do método exemplificado foi possível estimar valores para as áreas que, apesar de um pouco afastados, se assemelham aos real. Conseguiremos ter uma aproximação mais real se, ou aumentarmos o numero de esfera largadas no próximo teste ou

repetirmos o teste vários vezes e fizemos a médias dos resultados. Por exemplo se fizemos 20000 esferas resulta nas áreas 59,2 para o verde, 121,9 para o azul, e 238,6 para o roxo, muito melhor que o resultado anterior.